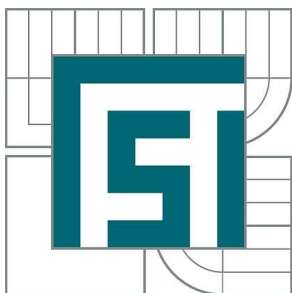


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A  
BIOMECHANIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND  
BIOMECHANICS

## SIMULAČNÍ MODELOVÁNÍ PARALELNÍCH MECHANISMŮ

SIMULATION MODELING OF PARALLEL MECHANISMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. LADISLAV CINTULA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. LUKÁŠ BŘEZINA, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2011/2012

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Ladislav Cintula

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Mechatronika (3906T001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Simulační modelování paralelních mechanismů**

v anglickém jazyce:

### **Simulation modeling of parallel mechanisms**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Paralelní mechanismy jsou charakteristické svou kinematickou strukturou prezentovanou uzavřeným kinematickým řetězcem. Koncový efektor mechanismu je tedy vázán k základně více než jedním ramenem. Tato konstrukce přináší výhodu především ve vysoké tuhosti mechanismu a v souvisejících vlastnostech. Nevýhodou takové konstrukce je potom zpravidla velice omezený pracovní prostor. Z pohledu simulačního modelování je tato konstrukce díky své komplexnosti poměrně problematická. Cílem práce je sestavení komplexního simulačního modelu zvoleného paralelního mechanismu a jeho analýza ve vybraných pracovních režimech. Předpokládá se použití simulačního prostředí Adams, popř. Matlab – SimMechanics a Ansys.

Cíle diplomové práce:

1. ☐ Analyzovat současné přístupy k simulačnímu modelování paralelních mechanismů
2. ☐ Sestavit simulační model zvoleného paralelního mechanismu
3. ☐ Analyzovat chování modelu pro vybrané pracovní režimy
4. ☐ Na základě provedené analýzy formulovat závěry a doporučení

Seznam odborné literatury:

Březina, L., Andrš, O., Březina, T.: NI LabView – Matlab SimMechanics Stewart platform design. Applied and computational mechanics, Vol. 2 (1) (2008), p. 235 -242

Lee, T-Y, Shim, J-K: Forward kinematics of the general 6-6 Stewart platform using algebraic elimination. Mechanism and Machine Theory, Vol. 36 (2001), p. 1073-1085

Merlet, J. P.: Parallel robots, 2nd Edition. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2005

Pierrot, F., Dauchez, P., Fournier, A.: Fast parallel robots. Journal of Robotic Systems, Vol. 8(6) (1991), pp. 829 - 840

Vedoucí diplomové práce: Ing. Lukáš Březina, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 20.10.2011

L.S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan fakulty

## **Anotácia**

Paralelné mechanizmy sú charakteristické svojou kinematickou štruktúrou prezentovanou uzatvoreným kinematickým reťazcom. Koncový efektor mechanizmu je potom viazaný k základni viac než jedným ramenom. Tato konštrukcia prináša výhodu predovšetkým vo vysoké tuhosti mechanizmu a v súvisiacich vlastnostiach. Nevýhodou takejto konštrukcie je potom spravidla veľmi obmedzený pracovný priestor. Z pohľadu simulačného modelovania je táto konštrukcia vďaka svojej komplexnosti pomerne problematická. Cieľom práce je zostavenie komplexného simulačného modelu zvoleného paralelného mechanizmu a jeho analýza vo vybraných pracovných režimoch. Predpokladá sa použitie simulačného prostredia Adams, príp. Matlab – SimMechanics a Ansys.

## **Kľúčové slová**

Paralelný manipulátor, delta robot, konštrukcia

## **Anotation**

Parallel mechanisms are characterized by their kinematic structure presented a closed kinematic chain. The end effector of mechanism is then bound to a base of over one arm. This design provides an advantage especially at high stiffness of mechanism and related properties. The disadvantage of such a structure is then usually very limited working space. In terms of simulation modeling is the construction due to its complexity rather problematic. The aim of work is design comprehensive simulation model chosen parallel mechanism and its analysis in selected working modes. Expected to use Adams simulation environment, if necessary. Matlab - SimMechanics and Ansys.

## **Keywords**

Parallel manipulator, delta robot, construction

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CINTULA, L. Simulační modelování paralelních mechanismů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lukáš Březina, Ph.D

## **Čestné prehlásenie**

Prehlasujem, že som túto diplomovú prácu vypracoval samostatne na základe pokynov a rád vedúceho práce, a vychádzal som z literatúry, ktorá je uvedená v zozname použitej literatúry.

V Brne, dňa 27.05.2010

.....  
Bc. Ladislav Cintula

## **Pod'akovanie**

Na tomto mieste by som rád pod'akoval vedúcemu mojej diplomovej práce pánu Ing. Lukášovi Březinovi, Ph.D. za jeho čas, podnety, pripomienky, vedenie a samotnú pomoc pri návrhu a realizácii tejto práce.





## Obsah

<b>1. Úvod.....</b>	<b>11</b>
<b>2. Úvod do robotizácie .....</b>	<b>13</b>
2.1. Klasifikácia robotov a ich štruktúr .....	14
2.2. Porovnanie sériových a paralelných štruktúr .....	16
<b>3. Súčasné prístupy k simulačnému modelovaniu paralelných mechanizmov .....</b>	<b>18</b>
3.1. Kinematika a dynamika robotov .....	18
3.2. Úloha kinematiky .....	18
3.2.1. Inverzná úloha kinematiky .....	19
3.2.2. Priama úloha kinematiky .....	19
3.3. Úloha dynamiky .....	20
<b>4. Zostavenie simulačného modelu Delta manipulátora .....</b>	<b>22</b>
4.1. História Delta manipulátora .....	22
4.2. Dizajn Delta manipulátora.....	23
4.2.1. Popis častí základných stavebných prvkov .....	24
4.2.2. Model Delta manipulátora v MSC Adams .....	27
4.3. Výpočet mobility riešeného mechanizmu .....	29
4.4. Kinematika delta robotu .....	30
4.4.1. Inverzná úloha kinematiky delta manipulátora .....	32
4.4.2. Priama úloha kinematiky delta manipulátora .....	34
4.4.3. Kinematika modelu v programe MSC Adams .....	36
4.5. Dynamika Delta manipulátora.....	38
4.5.1. Parametre dynamiky .....	39
4.5.2. Princíp virtuálnej práce.....	39
4.5.3. Výpočet dynamického modelu založený na princípe virtuálnych prác .....	40
4.5.4. Dynamika modelu v programe MSC Adams .....	42
4.6. Trajektória.....	43

4.6.1. Trajektória s požadovanou počiatočnou a koncovou rýchlosťou.....	43
<b>5. Analýza správania manipulátora pre vybrané pracovné režimy.....</b>	<b>46</b>
5.1. Simulácia v MSC Adams .....	46
5.2. Simulácia pomocou co-simulácie.....	47
5.3. Simulácia Delta modelu ako s tuhým prvkom .....	50
5.3.1. Statická analýza .....	50
5.3.2. Jednoduchá trajektória.....	52
5.4. Simulácia Delta modelu s pružnými prvkami .....	55
5.4.1. Pružné telesá v programe MSC Adams.....	56
5.4.2. Tvorba pružného telesa.....	59
5.4.3. Jednoduchá trajektória.....	59
5.4.4. Zložitejšia trajektória.....	62
<b>6. Záver .....</b>	<b>66</b>
<b>Literatúra .....</b>	<b>68</b>
<b>Zoznam skratiek.....</b>	<b>70</b>
<b>Zoznam značiek.....</b>	<b>70</b>
<b>Zoznam príloh .....</b>	<b>72</b>

# 1. Úvod

*„Moderné počítače umožňujú vybaviť stroje schopnosťami vnímať svoje okolie, účelne na ne pôsobiť a samostatne si plánovať svoju činnosť.“*

(neznámy autor)

V dôsledku postupnej globalizácie trhu sú výrobcovia výrobných strojov a robotov a ich zákazníci vystavení čím viac väčším konkurenčným tlakom. Dnešná doba sa vyznačuje vysokou náročnosťou na manipulátory pre kladené požiadavky a ciele, ktoré sú veľmi rozmanité a ich riešenie je často nutné prispôbiť. Preto sa častejšie vedľa tradičných strojov a robotov zo sériovou kinematikou začínajú objavovať zariadenia na báze nových kinematických štruktúr. Ide hlavne o zariadenia využívajúcu paralelnú kinematiku. Vďaka konkurenCIám sa na trhu objavujú nové materiály, ktoré výrazne zredukujú hmotnosti pohyblivých častí, pričom sa zachovávajú vynikajúce hodnoty tuhosti statické i dynamické a tým sa môže dosiahnuť podstatného zlepšenia dynamických vlastností daného mechanizmu. Týmto zlepšením vlastností môže viesť k zvýšeniu rýchlosti manipulácie s objektmi, respektíve produktivity práce, prípadne môže smerovať k zlepšeniu kvality výroby a predĺženiu životnosti nástrojov u výrobných strojov.

Robotika patri tiež medzi často sa rozvíjajúcu technickú oblasť. Roboti s paralelnou kinematickou štruktúrou sa objavili už koncom sedemdesiatich rokov. Do začiatku deväťdesiatich rokov tieto koncepty narážali na technické problémy hlavne v oblasti hardwaru a softwaru. Tieto problémy boli ošetrované vývojom výkonných riadiacich systémov. Robotika prešla od vzniku veľkým vývojom. Zdokonaľovala sa nielen umelá inteligencia ale aj samotná konštrukcia.

Paralelné mechanizmy sú použité tam, kde iné štruktúry nie sú dostačujúce a ich vlastnosti nespĺňajú dané požiadavky. Zariadenia na báze paralelnej kinematickej štruktúry sa čím ďalej tým viac presadzujú v priemysloch. Hlavne v oblasti manipulácie majú roboty s paralelnou kinematickou štruktúrou nezastupiteľnú úlohu. Tieto mechanizmy sa používali často napríklad vo výskume, pri výrobe solárnych článkov a už tradične zaujímajú významné miesto pri záverečnej manipulácii a dokončovaní výrobkov napríklad v potravinárskom priemysle.

Cieľom diplomovej práce je zostavenie modelu zvoleného paralelného manipulátora. Typ manipulátora sa zvolil *Delta*, pretože patri medzi najpoužívateľnejšie manipulátory

s paralelnou kinematickou štruktúrou a je skonštruovaný na Ústave výrobných strojov, systémov a robotiky Fakulty strojného inžinierstva VUT v Brne, s ktorým je potom možné porovnávať či kontrolovať výsledky so simulačným modelom. Práca sa zaoberá analýzou kinematiky a dynamiky uvedeného manipulátora. Určenie kinematiky je dôležité napríklad pre simuláciu pohybu robota, vyšetrenie pracovného priestoru či pre kalibráciu. Určenie dynamiky sa používa pre analýzu zaťaženia jednotlivých ovládaných kĺbov pri pohybe. Dynamické účinky silno ovplyvňujú správanie systému (rýchlo pohybujúca sa alebo ťažko naložená sústava). Výsledky tejto práce môžu byť využité i pre ďalšie experimenty s delta robotom.

V poslednom rade sa diplomová práca zaoberala analýzou modelu delta robota s použitím pružných prvkov, pomocou ktorých môže prebiehať porovnávanie vytvoreného modelu so skutočným modelom.

Pri jej vypracovaní sa využilo čo najviac dostupnej literatúry k tomu, aby sa podal hodnoverný obraz o tejto téme. Čitateľom poskytne dostatok informácií o danej problematike a možnostiach jej využitia v profesionálnej a súkromnej oblasti.

## 2. Úvod do robotizácie

*Robot* sa označuje ako automatický alebo počítačom riadený integrovaný systém schopný autonómnej, cieľovo orientovanej interakcie s prirodzeným prostredím podľa inštrukcií človeka. Táto interakcia spočíva vo vnímaní a rozpoznávaní daného prostredia a v manipulovaní s predmetmi, popr. v pohybovaní sa v tomto prostredí.

V 80. rokoch dvadsiateho storočia sa začali vo väčšom počte zaraďovať do technologických procesov v bývalom Československu priemyselné manipulátory a roboty. Postupom času roboty a manipulátory prešli dlhým vývojom a stali sa čoraz viac v mnohých oblastiach vo výrobných procesoch takmer nenahraditeľné.

### **Medzi základné charakteristiky robotov a manipulátorov spadajú:**

- vykonávajú prácu rýchlo a spoľahlivo,
- uľahčujú prácu,
- zvyšujú efektívnosť a produktivitu práce,
- zabezpečujú presnosť a kvalitu,
- slúžia najmä ako náhrada pre uľahčenie ťažkej, menej efektívnej ručnej práce.
- prvoradou úlohou zabezpečiť manipuláciu s minimálnou spotrebou pracovného času,
- vytvárajú čo najvhodnejšie podmienky pre prácu človeka alebo robota pri vysokej kvalite výroby a efektívnom využití výrobného zariadenia, zdrojov a energie.

Priemyselné roboty a manipulátory na základe druhu práce, ktorú musia vykonávať, majú rôzne konštrukcie, rozmery a technické parametre. Snaha o zvýšenie produktivity a kvality práce v rôznych odvetviach priemyslu vedie k pokroku vo vývoji dokonalejších a inteligentných robotických systémov, ktoré nachádzajú uplatnenie najmä:

- v automobilovom priemysle,
- odevnom priemysle,
- textilnom priemysle,
- potravinárskom priemysle,
- chemickom priemysle,
- strojárstve,
- sklárstve,
- medicíne,
- a na iných špecializovaných pracoviskách.

Vďaka presnosti ich práce sa začínajú uplatňovať vo väčšej miere aj pri chirurgických zákrokoch a z hľadiska bezpečnosti sa využívajú aj vo vojenskom priemysle.

## 2.1. Klasifikácia robotov a ich štruktúr

Na začiatku bola klasifikácia založená na definícii robota, ktorá sa spočiatku zameriavala na odlišnosti manipulátorov a robotov z hľadiska riadenia a programovania. Preferovali sa pojmy ako[1]:

- manipulátor (jednouúčelový manipulátor, manipulátor s pevným programom, apod.),
- synchronný manipulátor (človek vo slučke, man on line, master – slave manipulátor),
- robot (manipulátor s pružným programom),
- adaptívny robot (robot reagujúci na zmeny pracovnej scény),
- kognitívny robot (robot s určitou mierou umelej inteligencie).

Manipulátory môžu byť klasifikované podľa rôznych kritérií ako napríklad podľa počtu stupňov voľnosti, kinematickej štruktúry, použitých pohonov alebo geometrie pracovného priestoru.

### Klasifikácia podľa kritérií:

#### a) Počtu stupňov voľnosti

- *univerzálny robot* – so 6 stupňov voľnosti,
- *redundantní robot* – definovanú polohu a orientáciu koncového efektoru je možné dosiahnuť mnohospôsobmi., využívajú väčšiu voľnosť k obchádzaniu prekážok, alebo k pohybu v obmedzenom priestore,
- *deficitní robot* – s menej než 6 stupňov voľnosti (Scara roboty, Delta).

#### b) Podľa kinematickej štruktúry

- *sériové roboty* - s otvoreným kinematickým reťazcom manipulátoru,
- *paralelné roboty* - s uzatvoreným kinematickým reťazcom manipulátoru,
- *hybridné roboty* - kombinácia sériových a paralelných robotov.

#### c) Podľa druhu pohonov, s pohonmi

- *elektrickými*,
- *hydraulickými*,
- *pneumatickými*.

V súčasnej dobe sa najviac používajú konštrukcie priemyselných robotov a manipulatorov s elektrickými pohonmi. Hydraulické pohony sa používajú najmä tam, kde sú požadované vysoké nosnosti.



Obr.2. 1 Scara robot



Obr.2. 2 Robot PentaWH

d) Podľa geometrie pracovného priestoru

- *cylindrické,*
- *sférické,*
- *angulárne,*
- *scara.*

## 2.2. Porovnanie sériových a paralelných štruktúr

**Sériový manipulátor:** Kinematický reťazec, ktorý je viazaný na začiatku reťazca k základni.

**Paralelný manipulátor:** Kinematický reťazec, ktorý je viazaný na začiatku a aj na konci reťazca k základni a je zložený z báze, platformy a najmenej z dvoch navzájom nezávislých vodiacich reťazcov. Vodiace reťazce sú voči báze a platforme radené paralelne.

Kvôli nedostatkom vlastností sériových štruktúr sa začalo vývojom paralelných kinematických štruktúr. Každá štruktúra ma svoje špecifiká. Tieto prevedenia sa veľmi ťažko zrovnávajú a to z toho dôvodu, že každé prevedenie je zostrojené presne pre danú funkciu a riešenie daného problému.

Medzi hlavné výhody paralelných kinematických štruktúr patria [2]:

- nízke hmotnosti pohybujúcich sa častí,
- vysoká pracovná rýchlosť a zrýchlenie,
- prúty s guľovými alebo kardanovými kĺbmi sú namáhané na tlak, ťah v prípade vzpier bez väčšieho vplyvu ohybu,
- vyššia únosnosť,
- všetky pohony sú zhodné (unifikované diely),
- vysoká presnosť.

Medzi nevýhody paralelných kinematických štruktúr patria:

- v prípade šiestich stupňov voľnosti je pre riadenie lineárnych pohybov prútov potrebný riadiaci systém pre šesť pohybových os,
- vysoké nároky na riadenie, pretože v každom okamihu pohybu v priestore je nutné riešiť transformáciu súradníc, ktorá vypočítava dĺžku každého prútu pre bod daný v karteziánskych súradniciach,
- náročné uloženie prútov a náročný systém merania polohy pre zaistenie tuhosti a presnosti,
- otázky tepelnej stability (veľké dĺžky prútov),
- nepriaznivý pomer veľkosti pracovného priestoru k celkovému objemu stroja.

Ponuka paralelných manipulátorov sa v dnešnej dobe rozširuje, konkurencia medzi predajcami a výrobcami sa zvyšuje, čo spôsobuje aj následný pokles cien. Okrem základných typov, ako napr. hexapodu (obr.2.3), delta robotu (obr.2.4) existuje aj množstvo ďalších, ktoré sú zatiaľ vo fáze virtuálnych modelov alebo prototypov a hľadajú si cestu k uplatneniu v pra-



xi. Vývojári z rôznych oblastí hľadajú možnosti nasadenia a uplatnenia ich výhod oproti iným konvenčným zariadeniam. Niektoré typy poskytujú plných 6 stupňov voľnosti pohybu, iné 3 alebo 4 stupne voľnosti, prípadne iný počet. Hexapod je mechanizmus, u ktorého šesť paralelných vodiacich ramien s premennou dĺžkou spojuje bázu s platformou. Spojenie medzi bázou a ramenami sú realizované pomocou kardanových kĺbov a spojenie medzi platformou a ramenami pomocou sférických kĺbov. Vďaka tomuto usporiadaniu má platforma šesť stupňov voľnosti (posúva sa i rotuje okolo všetkých os). Z toho vyplýva, že pohyb jedného ramena ovplyvňuje polohu všetkých ostatných ramien, ide teda o nelineárny priestorový systém. To je typickou vlastnosťou všetkých paralelných kinematických štruktúr.

Podobne je rôzny aj spôsob a náročnosť ich riadenia. Niektoré typy majú úplne jednoduché riadenie korešpondujúce s karteziánskym súradnicovým systémom a iné potrebujú na riadenie zložité riadiace systémy pre aplikovanie výkonovo-náročných výpočtov v reálnom čase. Paralelný mechanizmus sa skúma z teoretického hľadiska a jeho využiteľnosti v praxi. Medzi najviac uplatňované aplikácie v súčasnosti patria rôzne tréningové simulátory, zariadenia na testovanie pneumatík, biomedicínske inžinierstvo, chirurgia, manipulačné triedenie, manipulácia a orientácia, obrábacie centrá, zariadenia pre zábavu. Víziou mechanizmu je dosiahnutie čo najvyššej tuhosti, presnosti a rozsahu pohybov. Najväčším nedostatkom je úzko limitovaný pracovný priestor.



Obr.2. 3 Hexapod



Obr.2. 4 Dela robot

### 3. Súčasné prístupy k simulačnému modelovaniu paralelných mechanizmov

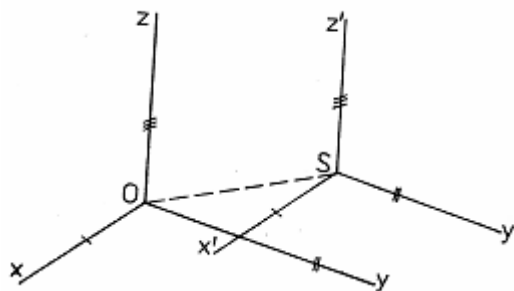
#### 3.1. Kinematika a dynamika robotov

Sústavou navzájom pohyblivo spojených členov, z ktorých sa jeden nepohybuje a tvorí rám, sú tvorené mechanizmy robotov a manipulátorov. Obsahujú binárne členy, ktoré sú spolu viazané pomocou priestorových kinematických dvojíc. Jednou z východiskových požiadaviek na konštrukciu robotov sú kinematické a dynamické parametre, najmä čo sa týka ich tvaru a prevádzkových parametrov. Počtom stupňov voľnosti je charakterizovaná vzájomná pohyblivosť členov, ktoré tvoria kinematickú dvojicu. Pohyblivosť členov sa zhoduje s počtom nezávislých jednoduchých pohybov, ktoré môžu obidva členy voči sebe vykonávať [3].

Pre manipulačné teleso sa dá ľubovoľná poloha všeobecne určiť šiestimi súradnicami:

- tri z nich určujú polohu ťažiska objektu  $S$  v pevnom súradnicovom systéme  $O, x, y, z$  ;
- tri určujú orientáciu.

Pod orientáciou rozumieme natáčanie objektu vzhľadom k osiam súradnicového systému  $S, x, y, z$ , ktorý je unášaný spolu s objektom a jeho osi sú rovnobežné s osami pevného súradnicového systému (obr. 3.1).



Obr.3. 1 Poloha strediska [4]

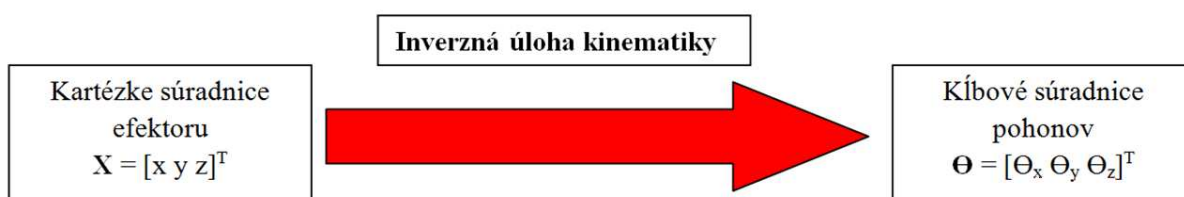
#### 3.2. Úloha kinematiky

Úlohou kinematiky je popisovanie správania sa telies a sústav telies bez ohľadu na sily a momenty, ktoré vyvolávajú akýkoľvek pohyb. Respektíve sa jedná o popis polohy častí manipulátora a prípadne následnými deriváciami sa môže určiť ich rýchlosť a zrýchlenie. Pre mechanizmy s paralelnou kinematickou štruktúrou je proces popísania kinematiky pomerne obťažný. Popis pohybu a ich správania je zložitejšie ako u manipulátorov zakladajúcich sa na sériovej kinematickej štruktúre. Hlavným problémom je podieľanie sa kinematických reťaz-

cov na polohe koncového efektora. Modelovanie kinematiky paralelných mechanizmov sa dá riešiť priamou alebo inverznou metódou.

### 3.2.1. Inverzná úloha kinematiky

Inverznou metódou sa na základe znalosti koncovej polohy manipulátora získajú potrebné natočenia prípadne posuvy jednotlivých ramien podľa toho, o aký manipulátor ide. Inverzná úloha kinematiky pre polohy sa môže formálne zapísať  $\theta = f^{-1}(x)$ . Pre paralelné manipulátory sa odvodenie inverzných rovníc uskutočňuje buď metódou transformačných matíc [5], alebo pomocou geometrických metód [6].



Obr.3. 2 Schéma výpočtu inverznej kinematiky

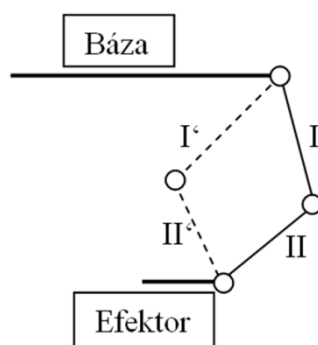
### 3.2.2. Priama úloha kinematiky

Opakom inverznej úlohy kinematiky je úloha priama. Priamou metódou sa na základe znalosti kĺbových súradníc (natočenia prípadne posuvu) hľadá poloha koncového bodu manipulátora. Priama úloha kinematiky pre polohy sa môže formálne zapísať  $x = f(\theta)$ . Na rozdiel od sériových robotov je riešenie priamych kinematických rovníc pre paralelné manipulátory v dôsledku ich nelineárnosti pomerne komplikované.



Obr.3. 3 Schéma výpočtu priamej kinematiky

Výpočet priamej úlohy často vedie k nejednoznačným riešeniam, t.j. existuje viac možných natočení členov pre koncovú polohu efektora (obr. 3.4). Priamu úlohu možno riešiť napr. analyticky alebo interakčnými metódami, ako sú Newton-Raphasonova metóda, Gauss-Newtonova metóda atd. [7]



Obr.3. 4 Zobrazenie spôsobu dosiahnutia koncového efektora

### 3.3. Úloha dynamiky

Vývoj dynamických modelov bol predmetom intenzívneho výskumu v posledných desaťročiach. Hlavný problém spočíva v nájdení riešenia, ktorý by dostatočne reprezentoval reálny systém, a ktorý by sa dal ľahko vypočítať v reálnom čase pre implementáciu do riadiaceho algoritmu. Výpočet dynamiky je u paralelných štruktúr zložitejší ako u sériových robotov, pretože všetky časti u paralelných štruktúr sa navzájom ovplyvňujú. Model dynamiky sa používa pri riadení manipulátora hlavne, keď dochádza k pohybu s veľkými zrýchleniami alebo prenášaním bremien.

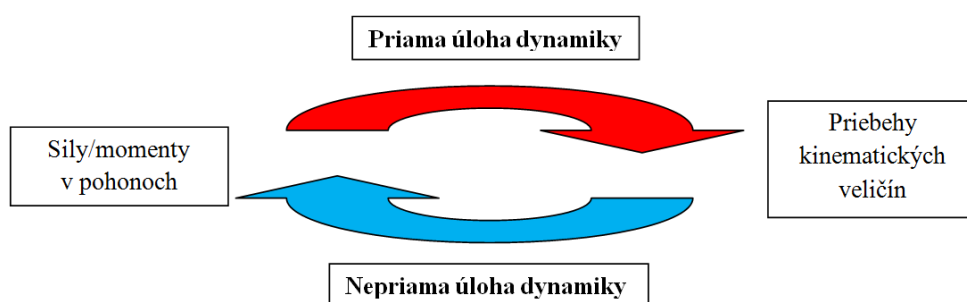
Metódy modelovania dynamiky sú postavené na niekoľkých základných princípoch ako napr. Newton-Eulrov princíp [8], Hamiltonov princíp [9], riešenie pomocou Lagrangeových rovníc [10], alebo za použitia kombinácie niektorých princípov napr. kombináciou Lagrangeových rovníc a Newton-Eulrového princípu [11]. Výpočet dynamiky pomocou vyššie uvedených metód pre priestorové paralelné manipulátory je pomerne komplikovaný a numerické riešenie je časovo náročné. Kvôli zložitosti výpočtu dynamiky sa často model zjednodušuje napr. zanedbaním zotrvačných momentov ramien manipulátora a zároveň predpokladu hmotnosti na ich koncoch [12], čo ale môže viesť k nepresnostiam správania modelu a tým dochádza k nepresnému návrhu riadenia manipulátora.

V poslednej dobe je najčastejší užívaný spôsob zostavenia dynamického modelu pomocou simulačných programov. Medzi najčastejšie používané programy sa zaraďujú MSC Adams, MATLAB/SimMechanics a LabView.

Výhodou týchto programov je, že matematicky zostavené modely sa dajú overiť pomocou týchto programov. Modely sa vytvárajú pomocou blokov (Simmechanics) alebo priamo vymodelovaním telies (MSC Adams). Uvedené programy umožňujú prácu s modelom komplexne, čo znamená vytvoriť model, ovládať model, spájať jednotlivé modely atd. Tieto funkcie sú veľmi účinným nástrojom pre „Rapid prototyping“ alebo pre klasický mechatronický prístup, kde sa berie v úvahu, že všetky fázy návrhu sú vzájomne prepojené a ovplyvňu-

jú sa navzájom. Toto je dôvod, prečo majú v praxi simulačné programy najväčšie zastúpenie pri vytváraní dynamického modelu.

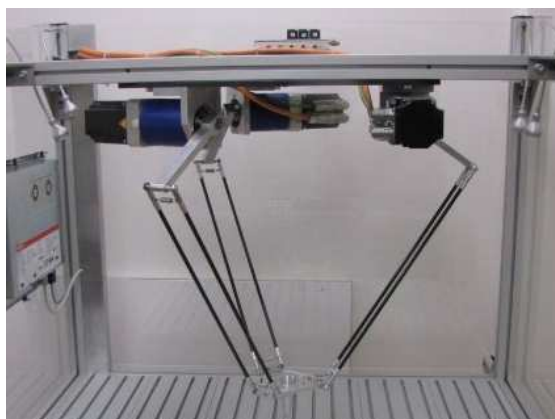
Tak ako kinematika mechanizmov sa dá i dynamika modelovať priamou a inverznou metódou. Nepriama úloha dynamiky sa zaoberá riešením pohybových rovníc pri známom časovom priebehu polôh, rýchlosti a zrýchlenia obecných (klbových) súradniciach. Pri známych časovo závislých kinematických veličín sa určujú sily respektíve momenty v pohonoch. Nepriama úloha je z matematického hľadiska jednoduchšia. Priama úloha sa zaoberá riešením pohybových rovníc pri známych silách pôsobiacich na sústavu. Výsledkom je priebeh polohy, rýchlosti a zrýchlenia obecných (klbových) súradníc  $\theta$  v čase.



Obr. 3. 5 Schéma výpočtu dynamiky

## 4. Zostavenie simulačného modelu Delta manipulátora

Táto kapitola sa zaoberá kinematickou analýzou Delta-manipulátora, ktorý bol zostavený na Ústave výrobných strojov, systémov a robotiky FSI VUT v Brne. Kinematická analýza slúži na určenie priamej a nepriamej úlohy kinematiky na základe analytickej geometrie. Znalosť kinematiky je potrebná pre riadenie robota, vyšetrenie pracovného priestoru, simuláciu pohybu robota, určenie singulárnych polôh, či pre kinematickú kalibráciu daného mechanizmu.



Obr. 4. 1 Fotografia analyzovaného Delta-manipulátora [13]

### 4.1. História Delta manipulátora

Delta robot bol navrhnutý v roku 1980 od Reymonda Clavela na École Polytechnique Federal de Lausanne (EPFL, Švajčiarsko). Išlo o mechanizmus s tzv. trojuholníkovou kinematickou štruktúrou. Účelom tohto nového typu robota bola manipulácia s malými a ľahkými predmetmi pri vysokej rýchlosti aspoň na terajšiu dobu. Neskôr spoločnosť Demarex odkúpila licenciю daného delta manipulátora pre baliaci priemysel. V roku 1999 Reymond Clavel dostal cenu za jeho dizertačnú prácu, v ktorej popísal delta robot. V tom istom roku ABB a Systems Sigpack začali predávať jeho robot s názvom FlexPicker (obr. 4.1). Postupne sa objavilo i niekoľko ďalších modifikácií tejto štruktúry, avšak pôvodná koncepcia nebola prekonaná a delta roboty dnes patria k najúspešnejším strojom s paralelnou kinematickou štruktúrou. Medzi modifikácie patria napr.: dvojité delta robot, STAR modifikácia, RPS modifikácia, TRICEPT modifikácia, atď.



Obr. 4. 2 FlexPicker od firmy ABB

## 4.2. Dizajn Delta manipulátora

Delta robot je paralelný robot s 3 stupňami voľnosti (DOF). Umožňuje teda priamočiary pohyb koncového efektora v smere os  $x$ ,  $y$  a  $z$ . V prípade zavedenia teleskopickej tyče môže ísť aj o robot so 4 stupňami voľnosti, respektíve koncový efektor sa môže pohybovať v osiach  $x$ ,  $y$  a  $z$ , a otáčať okolo osy  $z$ . Prenos pohybu od tohto pohonu býva prevedený cez Kardanové kĺby s teleskopickým hriadeľom. Výpočet stupňov voľnosti je uvedená v kapitole 4.3. *Výpočet mobility delta manipulátora*. Kinematický reťazec delta robota je zložený v poradí R2S2S (rotačná väzba, 2x paralelne sférický kĺb, 2x paralelne sférický kĺb)

Delta manipulátor je vhodný na rýchlu manipuláciu s malými a ľahkými predmetmi. Tento manipulátor sa používa v odvetviach, kde manipulátori fungujú na princípe pick and place. Delta sa skladá z dvoch platforiem (základne s pohonmi, menšej na uchopenie efektora), troch ramien, šiestich vzpier a efektora.

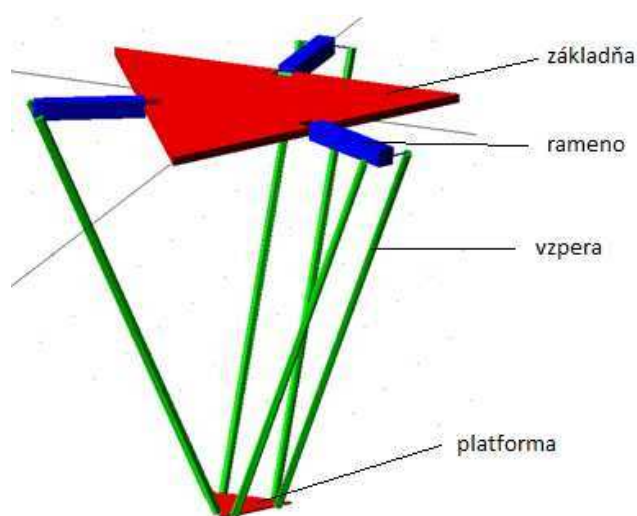
Pohony sa montujú na základňu, čo má za následok veľmi vysoké zrýchlenie (až do 12 G v priemyselných aplikáciách) koncového efektora. Tieto pohony sú pripevnené na ramenách, ktoré sú voči sebe pootočené o  $120^\circ$ . Ramená sú na konci prepojené so vzperami pomocou sférických kĺbov. Tieto sú usporiadané paralelne a zároveň uchycujú pohybujúcu sa platformu. Takéto usporiadanie vzpier umožňuje priamočiary pohyb koncového efektora.

#### 4.2.1. Popis častí základných stavebných prvkov

Vlastnosti a možnosti manipúlátora závisia od stavebných prvkov a ich vhodnej voľby. V súčasnosti trh ponúka mnoho materiálov a prvkov pre ich zostavenie.

Základnými stavebnými prvkami (obr. 4.3) každej konštrukcie sú:

- základňa,
- ramená,
- kĺby,
- platforma,
- efektor.

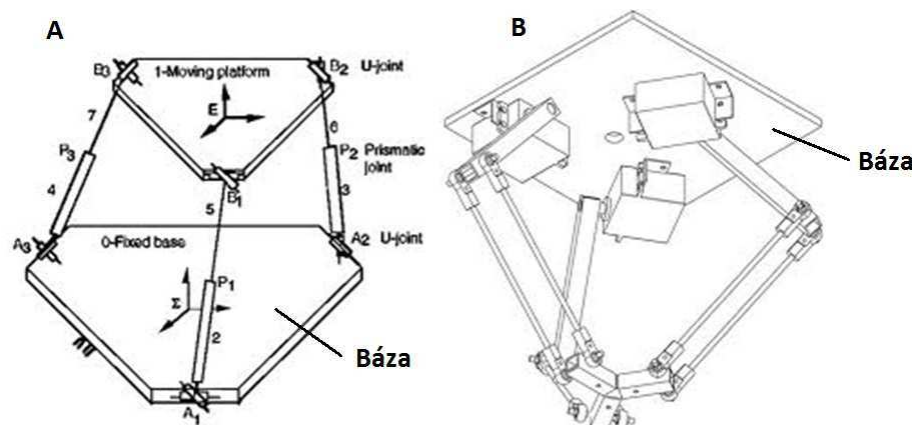


Obr. 4. 3 Zjednodušený model Delta manipúlátora

#### Základňa

Základňa (báza, základ) tvorí statickú časť robota. Základňa nemá presne stanovený tvar. Od bázy sa odvíjajú ďalšie časti mechanizmu. Veľkosť základne nepriamo ovplyvňuje veľkosť pracovného priestoru. Vo väčšine prípadov bývajú na báze pripevnené pohonné a riadiace prvky. Týmto usporiadaním sa ovplyvňuje hmotnosť ostatných riadiacich súčastí. Aj keď báza nepatrí medzi pohyblivé časti, i tak je ovplyvňovaná výslednými dynamickými vplyvmi. U nedostatočnej tuhosti základne má u niektorých typov za následok rozkmitanie bázy a tým i celého mechanizmu, pričom výsledkom tohto rozkmitania by mal za následok pokles presnosti mechanizmu. I keď je báza základným stavebným prvkom nemusí byť vždy umiestnená v spodnej polohe celkového pracovného priestoru.





Obr. 4. 4 Manipulátory A) s dolnou základňou, B) s hornou základňou

## Ramená

Ramená tvoria spolu s kĺbmi základnú časť vodiacich reťazcov. Ich úlohou je prenos pohybu z bázy smerom k platforme. Pri vhodnom usporiadaní ramien spojených pomocou kĺbov možno dosiahnuť vysokú tuhosť. Výsledná tuhosť má za následok odpovedajúcu presnosť a možnosť dosiahnutia vysokých manipulačných rýchlostí.

Ramená sa rozdeľujú do dvoch hlavných skupín:

- ramená s premenlivou dĺžkou,
- ramená s nepremenlivou dĺžkou.

Dôležitou vlastnosťou ramien je statické a dynamické správanie. Ramená bývajú najčastejšie namáhané kombináciou ťahu, tlaku a ohybu.

U premenlivých ramien sú umiestnené pohony priamo na ramenách, tým sa zväčší hmotnosť, čo výrazne ovplyvňuje dynamiku správania manipulátora. Táto skupina ramien je nevyhovujúca pre delta manipulátor. Príčinou je, že akčné členy manipulátora musia byť čo najľahšie, aby sa mohla zabezpečiť rýchla a presná manipulácia s koncovým efektorom respektíve prenášaným objektom.

Ramená s premenlivou dĺžkou sú:

- tlakové (ovládané pneumaticky alebo hydraulicky),
- mechanické.

Ďalšou nevýhodou umiestnenia pohonov priamo na ramenách je, že sa musia zabezpečiť vodiče, či ide o elektrické, pneumatické alebo hydraulické, ktoré majú funkciu ovládania pohonov. U elektrických vodičov ide prevod elektrických impulzov priamo napríklad do DC motorov, u pneumatických vodičov o prepravu stlačeného vzduchu a u hydraulických

o prepravu kvapalín. Výhodou tohto typu ramena je schopnosť samostatne zaistiť dĺžkovú zmenu vzdialenosti.

Ramená s nepremennivou dĺžkou samo o sebe nezaistia požadovanú zmenu polohy koncového efektora voči základni. Takýto typ ramien sa používa tam, kde je potreba rýchlej manipulácie s častou zmenou smeru pohybu.

## Kĺby

Funkciou kĺbov je prenášať sily a pohyb medzi základňou a menšou platformou. Presnosť manipulatéra je závislá od kvality kĺbov. Kĺby sú namáhané a podliehajú časovému opotrebeniu, prípadne podliehajú hystereznému efektu. Veľký vplyv má hmotnosť telesa, s ktorým sa manipuluje. Príliš veľká hmotnosť vyvoláva veľké deformácie a potom kĺby nie sú schopné udržať geometricky definovanú pozíciu stredu otáčania. Ďalšou nevýhodou u guľových kĺbov býva trenie. Zníženie koeficientu trenia možno previesť užitím špeciálneho maziva. Už spomenutý guľový kĺb umožňuje užitie 3 otáčavých stupňov voľnosti.

Na delta manipulatér sa použili guľové kĺby. Nevýhodou tohto prevedenia je možnosť vykláznutia kĺbu z kĺbovej jamky. K zabráneniu vykláznutia kĺbu z jamky sa používajú prítlačné pružiny. U delta manipulatéra sú použité dve paralelne pripevnené pružiny, aby zabezpečili správne natočenie puzdra voči kĺbu.



Obr. 4. 5 Guľové kĺby pridržiavané pružinami

## Platforma

Úlohou platformy je upevnenie koncového efektora. Platforma je posledná pohyblivá časť kinematického reťazca. U paralelných mechanizmov sa môže platforma nachádzať nad základňou alebo pod základňou. Pri umiestnení platformy nad základňou (bázou) sa pri manipulácii kladie dôraz na presnosť, pričom u platformy, ktorá je pripojená pod bázou, na rýchlosť. Platformy by mali byť vyrobené z ľahkých a pevných materiálov. Dosiahne sa tak vyššia

redukcia zotrvačných síl a momentov. Aj veľkosť platformy zásadne ovplyvňuje funkciu, uplatnenie a stavbu celého robota.

## Efektor

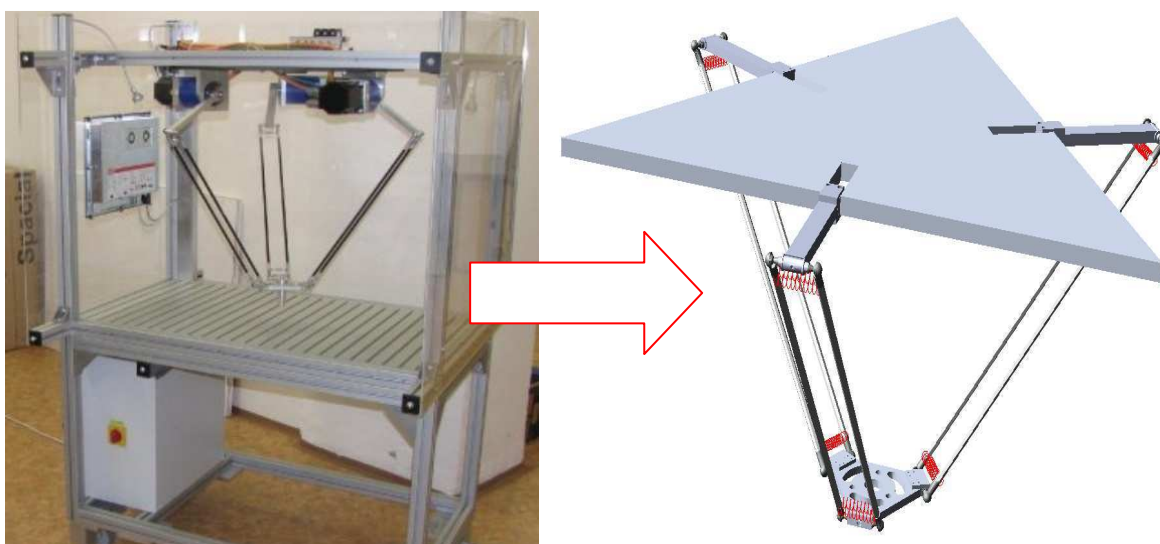
Úlohou efektorov je prenášanie predmetov, či pridržiavanie predmetov počas doby obrábania. Nebýva súčasťou manipulátora. V oblasti nasadenia v paralelných kinematických štruktúrach sa skoro vždy jedná o dočasné uchopenie za účelom prepravy.

Efektor môže uchopovať predmety:

- mechanicky,
- magneticky,
- podtlakom.

Pri vyjadrovaní kinematických rovníc sa nebral do úvahy koncový efektor. Z dôvodu rôznych typov efektora a následne možnosti ľahkého pripevnenia na platformu sa koncový efektor pri vyjadrovaní rovníc vypustil a následne sa dolnou platformou delta robota počítalo ako s koncovým efektorom.

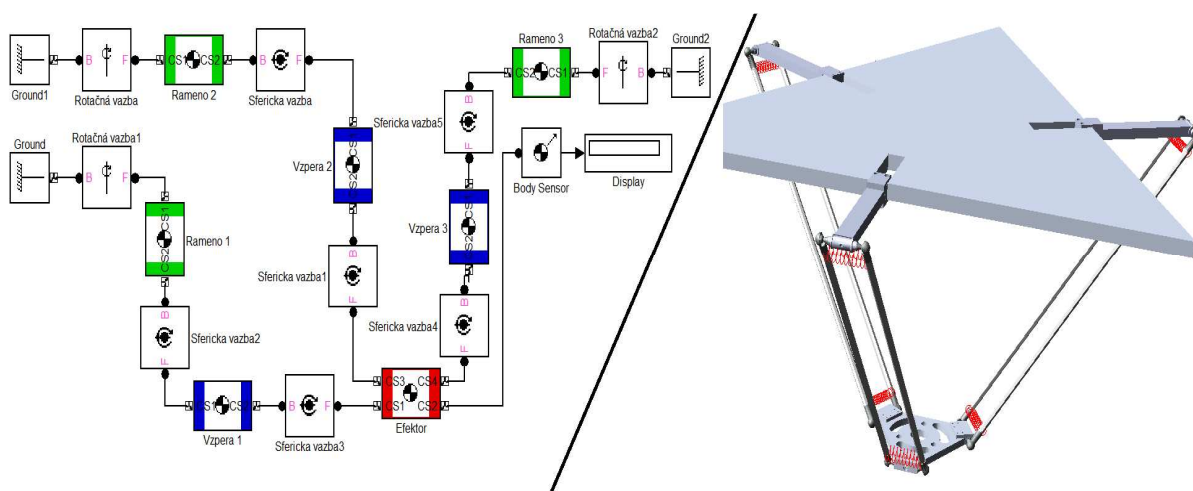
### 4.2.2. Model Delta manipulátora v MSC Adams



Obr. 4. 6 Prevod reálneho modelu [13] do modelu na použitie v programe MSC Adams

Model pre simuláciu v programe MSC Adams (obr. 4.6) bol namodelovaný podľa reálneho modelu, ktorý ako bolo spomenuté na začiatku kapitoly 4, sa nachádza FSI VUT v Brne. Delta robot sa vytváral v programe SolidWorks, i keď aj samotný program MSC Adams dokáže modelovať priestorové prvky. Keďže MSC Adams sa používa hlavne na simu-

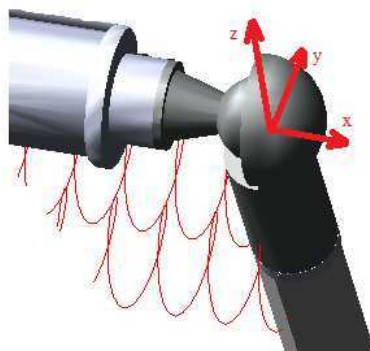
láciu objektov, oveľa náročnejšie sa zostavujú zložité telesá v porovnaní so SolidWorks. Zostavený model v SolidWorks sa veľmi ľahko exportuje do MSC Adams pomocou prevedenia do formátu „*Parasolid (.x\_t)*“, kde je potom potrebné jednotlivými časťami priradiť materiály, z ktorého sú zostavené. Ramená i pohyblivá platforma delta-robota sú zhotovené zo zliatiny hliníka EN AW-6060 a guľové kĺby boli použité od spoločnosti T.E.A. Technik typu C10. Na vzpery boli použité duté karbónové (uhlíkové) trubky s vonkajším priemerom 12 mm, vnútorným priemerom 5 mm a dĺžky 500 mm od spoločnosti 5M. Výhodou programu MSC Adams v porovnaní s Matlab/Simmechanics je, že simulovaný model má tvar podobný reálnemu modelu a z toho dôvodu odpadá prepočet napr. momentov zotrvačnosti, prípadne sa môže vizuálne kontrolovať správanie modelu počas simulácie. Nevýhodou v programe MSC Adams je, že pri geometricky/graficky zložitých objektoch môže prebiehať simulácia pomalšie s porovnaním s Matlab/Simmechanics.



Obr. 4. 7 Porovnanie modelu vytvorený v Matlab/Simmechanic (naľavo) s MSC Adams (vpravo)

V reálnej konštrukcii delta manipulátora tvorí základňu celá konštrukcia „vozík“ okolo manipulátora (obr. 4.6). Nakoľko (v tomto prípade) výrazne neovplyvňuje funkciu manipulátora, základňa bola nahradená rovnostranným trojuholníkom, ktorý slúži iba na lepšiu predstavu pri výpočte kinematiky, respektíve sa importovali do MSC Adams iba aktívne časti manipulátora ako sú ramená, vzpery a efektor vrátane kĺbov.

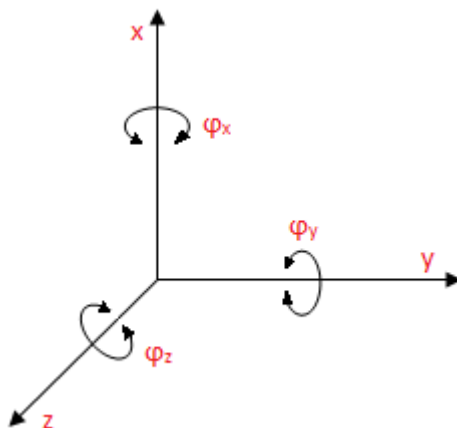
Pri použití guľových kĺbov nielen v reálnom modeli ale aj v modeli MSC Adams bolo potrebné zakomponovať pružiny. Rozdielom medzi zakomponovanými pružinami v jednotlivých modeloch je, že u reálneho modelu sa použili pružiny, ktoré zabraňovali vyskakovaniu kĺbov z puzdra a v programe slúžia na udržiavanie rovnovážnej polohy puzdier, t.j. aby sa nepretáčali okolo osi z a tým aby nedošlo ku kolízii s kĺbmi.



Obr. 4. 8 Detailný pohľad na kĺb

### 4.3. Výpočet mobility riešeného mechanizmu

*Mobilita* je daná počtom stupňov voľnosti manipulátora, hovorí koľko typov pohybu môže daný mechanizmus vykonávať. Na určenie polohy platformy v rovine sú potrebné 3DOF a v priestore 6DOF. V rovine sa môže vykonávať translácia v smere x a y a rotácia okolo osi  $\varphi_z$ , a v priestore translácia v smere os x, y a z a rotácia okolo os  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$  a  $\varphi_z$ .



Obr. 4. 9 Počet stupňov voľnosti v priestore

Mobilita Detla manipulátora sa získa z modifikovaného Grüblerovho vzorca [11], ktorý sa využíva najmä pri zložitých paralelných konštrukciách.

$$F = \lambda(n - j - 1) + \sum_{i=1}^g f_i - f_{id} + s \quad (4.1)$$

Kde:

F – počet DOF

$\lambda$  – konštanta - v priestore  $\lambda = 6$

- v rovine  $\lambda = 3$

n – počet všetkých členov mechanizmu

j – počet kinematických dvojíc

$\xi_i$  – počet DOF od jednotlivých kinematických dvojíc

$\xi_{id}$  – DOF členov, ktorí nemajú vplyv na polohu efektora

s – počet pasívnych väzieb tzv. geometrické predpoklady

Delta robot je priestorový manipulátor, preto  $\lambda=6$ . Skladá sa z pracovnej plošiny, základného telesa, 3 ramien a zo 6 vzpier.

$$n = 1 + 3 \cdot 1 + 3 \cdot 2 + 1 = 11 \quad (4.2)$$

$$j = 3 \cdot (R + 4 \cdot S) = 3 \cdot (1 + 4 \cdot 1) = 15 \quad (4.3)$$

Ramená sú viazané k základnému telesu rotačnými väzbami a k vzperám sférickými väzbami. Pre rotačnú väzbu platí  $\xi_r = 1$  a pre sférickú  $\xi_s = 3$ . Rotačných väzieb je celkom 3 a sférických 6.

$$\xi_i = 3 \cdot (R + 4 \cdot S) = 3 \cdot (1 + 4 \cdot 3) = 39 \quad (4.4)$$

$$\xi_{id} = 3 \cdot (1 + 1 + 1) = 12 \quad (4.5)$$

Dosadením do vzťahu (5.1) dostaneme:

$$F = 6 \cdot (11 - 15 - 1) + 39 - 12 - 0 = -3 \quad (4.6)$$

Týmto spôsobom sa overilo, že sústava má 3 stupne voľnosti. Sústava sa môže pohybovať v smere osí x, y a z. Výsledok -3 určuje počet nutných DOF k tomu, aby bol manipulátor staticky určitý.

#### 4.4. Kinematika delta robotu

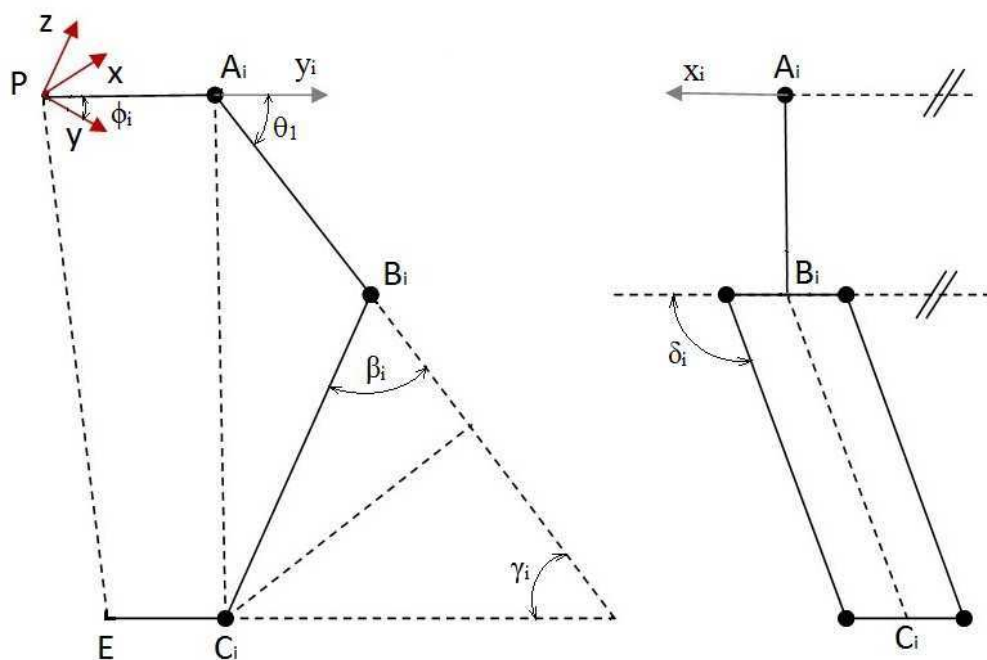
Vzhľadom k tomu, že Delta je manipulátor s uzavretou kinematikou, je oveľa ťažší výpočet kinematiky. Pre zjednodušenie modelu a k zníženiu počtu parametrov sú tieto predpoklady [14]:

- Pohyblivá platforma musí byť vždy paralelná k základni a jej orientácia okolo osí kolmá k základnej doske. Natočenie platformy má byť stále nulové voči základni. Kĺby rovnobežných vzpier môžu byť nahradené jednou vzperou a to bez zmeny kinematického správania manipulátora.
- Všetky kĺby (medzi základňou a horným ramenom a medzi vzperami a pohybujúcou sa platformou) sú zhodne umiestnené na kružnici. Tak pohyblivá platforma môže byť nahradená bodom E, v ktorom sú spojené všetky 3 vzpery.

Keďže delta manipulátor ma symetricky uložené ramená, každé rameno môže byť riešené samostatne [14]. V geometrii sa používa index  $i$  ( $i = 1,2,3$ ), ktorý slúži na identifikáciu troch ramien respektíve kĺbov, či vzpier. Každé rameno je pootočené o uhol  $120^\circ$ . To znamená, že jednotlivé ramená sú natočené voči globálnemu súradnicovému systému o  $\alpha_1 = 0^\circ$ ,  $\alpha_2 = 120^\circ$  a  $\alpha_3 = 240^\circ$ .

Kinematika delta robota sa môže určiť na základe analýzy (obr. 4.10), kde  $P$  predstavuje stred základne a  $A_i$  (4.7) sú tri body, ktoré sa nachádzajú v strede troch strán báze. V týchto bodoch sú ramená pripojené k základni a zodpovedajú postaveniu pohonov.  $E$  je stred pohybujúcej sa platformy. Karteziánske súradnice  $[X \ Y \ Z]$  a  $[x_i \ y_i \ z_i]$  sú definované tak, že  $xy$  rovina a  $x_i y_i$  roviny sú rovnaké a zhodujú sa s rovinou základne. Osi  $z$  a  $z_i$  sú kolmé na vyššie uvedené roviny, a preto sú identické. Uhol medzi osou  $y$ , t.j.  $P_y$  a osou  $y_i$ , t.j.  $P_{y_i}$ ,  $PA_i$  alebo  $A_i y_i$  je  $\phi_i$ .  $PA_i$  je vždy rovnobežná s  $EC_i$ , čo je z jedných predpokladov. Rotačný kĺb u  $A_i$  dovoľuje rotáciu ramena  $A_i B_i$  len v  $y_i z_i$  rovine.

Na  $B_i$  sú pasívne sférické kĺby. Takže  $B_i C_i$  môžu mať zložky pozdĺž všetkých troch osí, a to  $A_i x_i$ ,  $A_i y_i$  a  $A_i z_i$ .  $\theta_i$  je uhol medzi  $A_i B_i$  a  $A_i y_i$ .  $\beta_i$  je uhol medzi  $A_i B_i$  a vzperou, ktorá vyplýva z priesečníka roviny  $y_i z_i$ . Rovnobežník je zobrazený na pravej polovici obrázku (4.10).



Obr. 4. 10 Zobrazenie Delta manipulátora v  $y_i z_i$  v rovine (naľavo), delta manipulátor v  $x_i z_i$  v rovine (napravo)

Modelovanie kinematiky delta manipulátora sa dá riešiť ako bolo spomenuté v kapitole 3 priamou alebo inverznou metódou. Pre zvolený manipulátor sa inverznou kinematikou

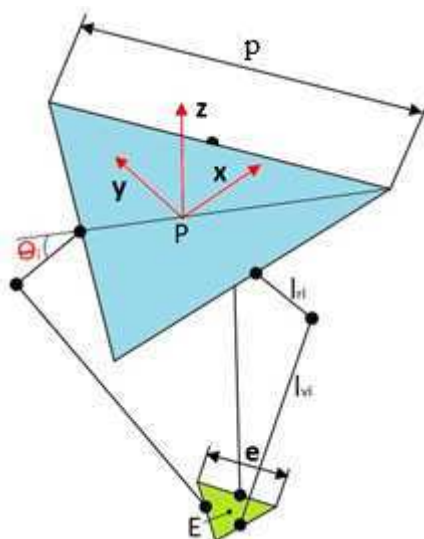
počítajú natočenia 3 ramien ( $l_{r1}$ ,  $l_{r2}$ ,  $l_{r3}$ ) na základe znalosti karteziánskych súradníc koncového efektora  $E = [x \ y \ z]$ . Potom priamou metódou sa zo známych 3 ramien počítajú karteziánske súradnice koncového efektora.

#### 4.4.1. Inverzná úloha kinematiky delta manipulátora

Na začiatok pred výpočtom nepriamej úlohy je potrebné určiť parametre delty:

- $p$  - dĺžka strany základne,
- $e$  - dĺžka strany pohyblivej platformy,
- $l_r$  - dĺžka ramena,
- $l_v$  - dĺžka vzpery.

Tieto parametre sú fyzické a určujú sa podľa rozmerov delty.



Obr. 4. 11 Zjednodušený pohľad delta manipulátora

Keďže základňa a pohyblivá platforma majú tvar rovnostranného trojuholníka, body  $A_1$  a  $C_1$  sa dajú určiť podľa (4.7) a (4.8). Rameno robota  $A_1B_1$  je možné otáčať iba v rovine  $YZ$ ; tvorí kruh so stredom v bode  $A_1$  o polomere  $l_r$ . Na rozdiel od bodu  $A_1$  sú body  $B_1$  a  $C_1$  sférické kĺby, čo znamená, že vzpera  $E_1B_1$  sa môže voľne otáčať relatívne k  $C_1$ . Vytvára sa guľa so stredom v bode  $C_1$  o polomere  $l_v$ .

$$A_1 \left( 0, \frac{z}{\sqrt{3}}, 0 \right) \quad (4.7)$$

$$C_1 \left( x, y - \frac{e}{\sqrt{3}}, z \right) \quad (4.8)$$

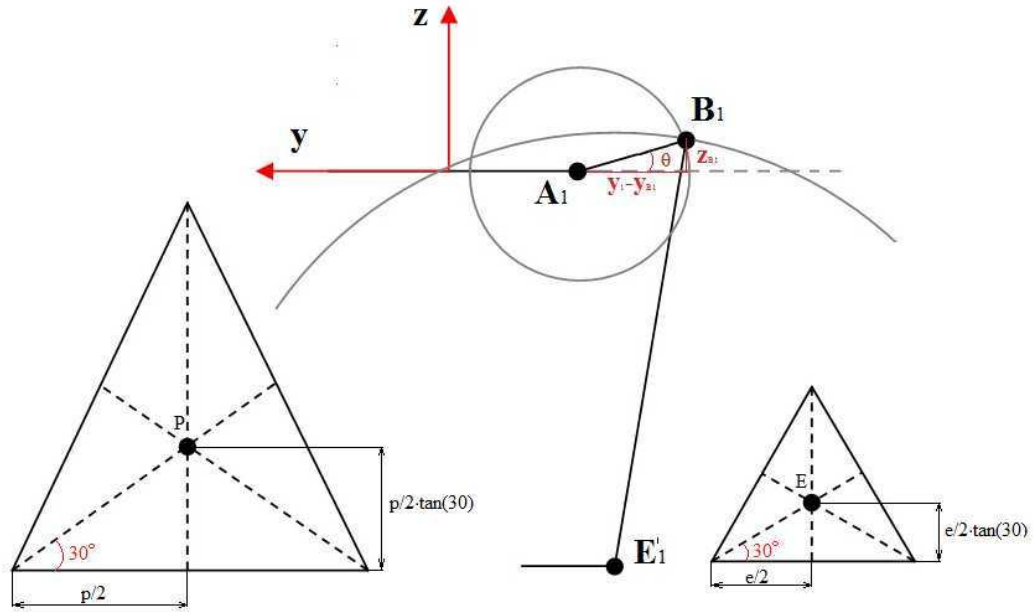


Priesečník tejto oblasti a YZ roviny je kružnica so stredom v bode  $C_1'$  a polomerom  $C_1'B_1$  (4.9), kde  $C_1'$  je priemet bodu  $C_1$  v roviny YZ. Bod  $B_1$  (4.10) sa získa teraz ako priesečník kružníc so známymi radiusami so stredmi v  $C_1'$  a  $A_1$  (volí sa iba jeden priesečník s menšou y-ovou súradnicou). Ak sa pozná pod  $B_1$ , dá sa vypočítať natočenie ramena  $\theta_1$  (4.11).

$$C_1'B_1 = \sqrt{(C_1B_1)^2 - (C_1C_1')^2} = \sqrt{l_v^2 - x^2} \quad (4.9)$$

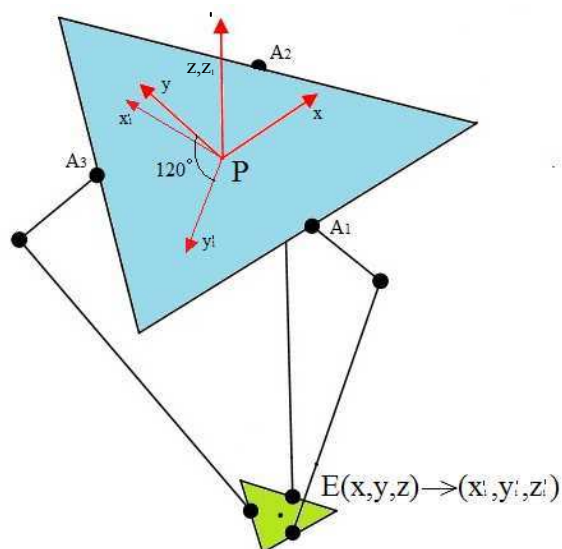
$$\begin{aligned} (y_{B_1} - y_{A_1})^2 + (z_{B_1} + z_{A_1})^2 &= l_r^2 \\ (y_{B_1} - y_{C_1'})^2 + (z_{B_1} + z_{C_1'})^2 &= l_v^2 - x^2 \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{z_{B_1}}{y_{A_1} - y_{B_1}}\right) \quad [\text{rad}] \quad (4.11)$$



Obr. 4. 12 Detailné pohľady na zjednodušený model Delta manipulátora

Z algebrickej jednoduchosti vyplýva, že rameno  $A_1B_1$  sa pohybuje len v roviny YZ, následne sa môžu úplne vypustiť súradnice X. Táto výhoda pomáha k získaniu zostávajúcich uhlov  $\theta_2$  a  $\theta_3$ . Využívajú sa symetrie delty a môže sa otočiť súradný systém v roviny XY okolo osi z o uhol  $120^\circ$  proti smeru hodinových ručičiek.



Obr. 4. 13 Natočenie súradného systému na výpočet  $\theta_2$

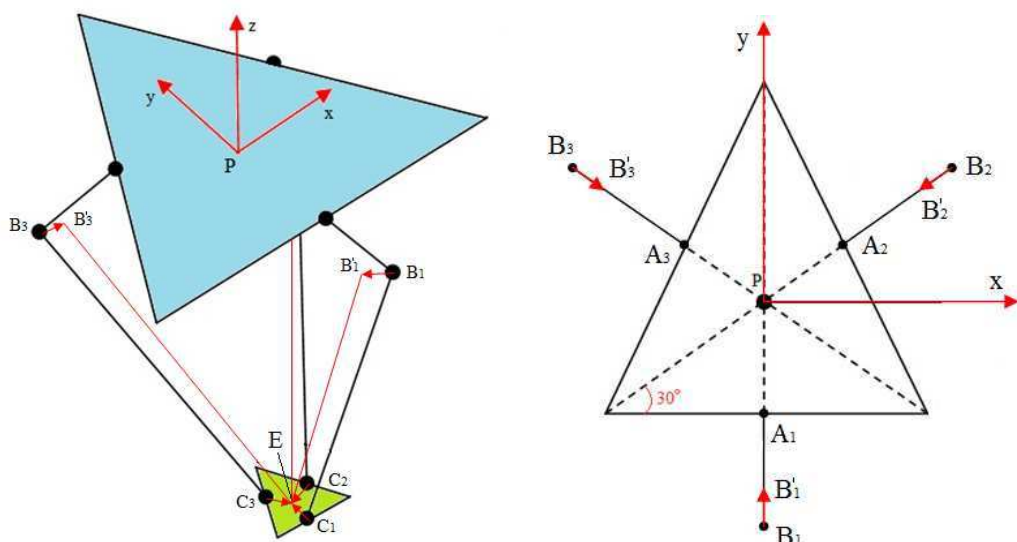
Natočením súradného systému  $X'Y'Z$  sa dá vypočítať uhol  $\theta_2$  pomocou rovnakého postupu, ktorý sa použil pri výpočte  $\theta_1$ . Jediné, čo je potrebné zistiť, sú nové súradnice  $x'$  a  $y'$  pre bod E, ktorý možno ľahko uskutočniť pomocou zodpovedajúcej rotačnej matice  $R_{zi}$  (4.12). Na získanie uhlu  $\theta_3$  sa buď súradný systém otočí v smere hodinových ručičiek o  $120^\circ$  alebo sa otočí o  $240^\circ$  proti smeru hodinových ručičiek.

$$R_{zi} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 \\ \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$\begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 \\ \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

#### 4.4.2. Priama úloha kinematiky delta manipulátora

Na základe zadaných uhlov  $\theta_i$ ,  $i=(1,2,3)$  sa dajú ľahko nájsť súradnice bodov  $B_1$ ,  $B_2$  a  $B_3$  (obr. 4.10). Vzpery  $B_1C_1$  a  $B_2C_2$  a  $B_3C_3$  sa môžu voľne otáčať okolo bodu  $B_1$ ,  $B_2$  a  $B_3$ , respektíve tvoria tri gule s polomerom  $l_v$ .



Obr. 4. 14 Transformácia sférických kĺbov

Najprv pri výpočte priamej úlohy je potrebné transformovať stredy gúľ t.j. body  $B_1$ ,  $B_2$  a  $B_3$  do bodov  $B'_1$ ,  $B'_2$  a  $B'_3$  (4.14 - 4.16). Po tomto presune všetky tri gule sa pretínajú v jednom bode E.

$$B'_1 \left( 0, -\frac{p-e}{2 \cdot \sqrt{3}} - l_r \cdot \cos(\theta_1), -l_r \cdot \sin(\theta_1) \right) \quad (4.14)$$

$$B'_2 \left( \left( \frac{p-e}{2 \cdot \sqrt{3}} + l_r \cdot \cos(\theta_2) \right) \cdot \cos(30), \left( \frac{p-e}{2 \cdot \sqrt{3}} + l_r \cdot \cos(\theta_2) \right) \cdot \sin(30), -l_r \cdot \sin(\theta_2) \right) \quad (4.15)$$

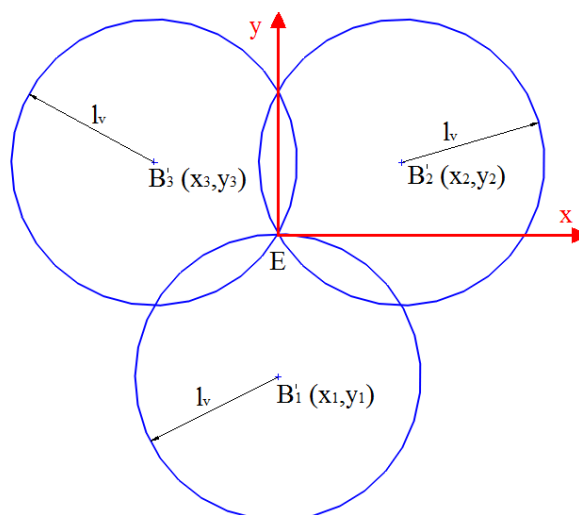
$$B'_3 \left( -\left( \frac{p-e}{2 \cdot \sqrt{3}} + l_r \cdot \cos(\theta_3) \right) \cdot \cos(30), \left( \frac{p-e}{2 \cdot \sqrt{3}} + l_r \cdot \cos(\theta_3) \right) \cdot \sin(30), -l_r \cdot \sin(\theta_3) \right) \quad (4.16)$$

Na nájdenie súradníc  $(x, y, z)$  bodu E sa musia riešiť tri rovnice v tvare (4.17 - 4.19), kde sú známe súradnice stredov gúľ  $B'_i$  ( $x_i, y_i, z_i$ ) a polomer  $l_v$ .

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = l_v^2 \quad (4.17)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = l_v^2 \quad (4.18)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = l_v^2 \quad (4.19)$$



Obr. 4. 15 Trilateracia

Rovnice (4.17 - 4.19) sa musia roznásobiť a následne upraviť. Upravené rovnice sa od seba odčítajú podľa (4.20 - 4.22):

$$g_1 = (4.17) - (4.18) \quad (4.20)$$

$$g_2 = (4.17) - (4.19) \quad (4.21)$$

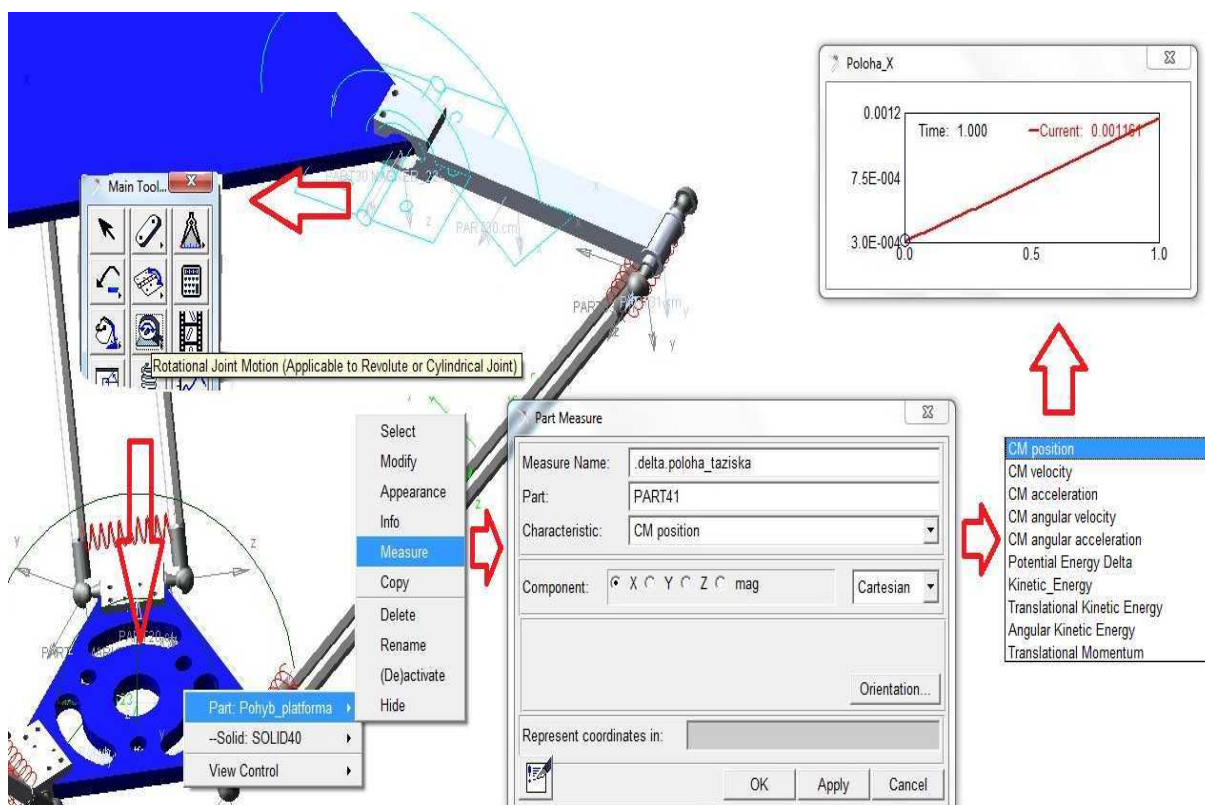
$$g_3 = (4.18) - (4.19) \quad (4.22)$$

Odčítaním rovníc (4.20)-(4.21) sa vyjadria súradnice x a y bodu E. Nakoniec sa zaviedie substitúcia v rovnici (4.17), tým vznikne kvadratická rovnica na nájdenie súradnice z bodu E. Pri známej súradnici z sa môžu dopočítať ostatné súradnice x a y.

#### 4.4.3. Kinematika modelu v programe MSC Adams

##### Priama úloha kinematiky

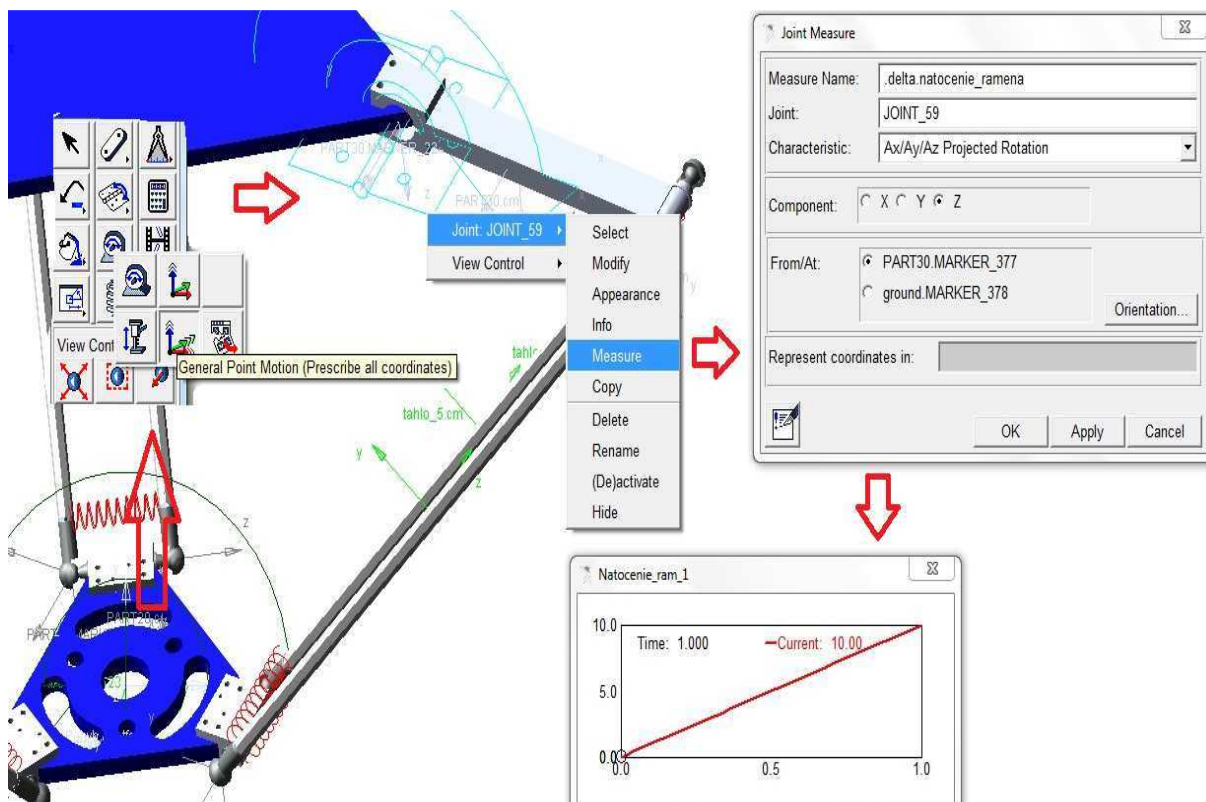
Na obrázku (4.16) je znázornený výpočet priamej kinematiky v programe MSC Adams. Výpočet prebieha tak, že do „Rotational Join Motion“ sa definuje natočenie  $\theta$  (o koľko sa má rameno natočiť), potom v ťažisku na pohyblivej platforme sa vytvorí merač (measure), kde sa vyberá v akých karteziánskych súradniciach sa chce merať. Pri určení zložiek, ktoré sa majú merať, je vidieť, že výstupom je trajektória respektíve prejdená dráha za čas.



Obr. 4. 16 Meranie polohy v programe MSC Adams

### Inverzná úloha kinematiky

Inverzná úloha kinematiky sa v tomto programe počíta tak, že miesto pohonu (Rotational Join Motion) sa použije General point motion, ktorý nebude pôsobiť v rotačnej väzbe na rameno, ale na pohyblivej platforme. V General point motion sa nastavuje v akých zložkách sa má pohybovať pohyblivá platforma (x, y, z), prípadne okolo akých os sa má natáčať (rotx, roty, rotz). Keďže dolná platforma môže vykonávať pohyb po rovinách rovnobežne voči hornej platforme (základni), tak sa v general point motion zadávajú iba zložky translácie v osách x, y a z. Po tejto konfigurácii sa vytvára merač (measure) na rotačnej väzbe medzi ramenom a základňou, ktorý znázorňuje priebeh natočenia závislé na čase, ktoré je potrebné na dosiahnutie zadanej polohy pohyblivej platformy.



Obr. 4. 17 Meranie natočenia ramena v programe MSC Adams

#### 4.5. Dynamika Delta manipulátora

Inverzný dynamický model paralelného robota sa dá vypočítať pomocou rôznych metód (napr. Lagrange alebo Newton-Euler). Spôsob výpočtu inverznej dynamiky modelu je rozpojenie uzavretého reťazca mechanizmu na pasívne kĺby a zvážiť najprv dynamiku stromovej štruktúry robota takto vytvoreného. Uzavretá slučka môže byť uvoľnená pomocou d'Alembertového princípu virtuálnej práce určená pomocou matice Jakobianu. Pre Delta robota zložitosť dynamického modelu nastáva predovšetkým v dôsledku pohybu vzpier. Dá sa tento problém zjednodušiť, ak ich momenty zotrvačnosti budú zanedbané. Tento predpoklad príliš neobmedzuje dynamické vlastnosti manipulátora, a to vďaka použitiu uhlíkových vlákien na konštrukcii. Potom smer sily medzi pohyblivou platformou a ramenom je daný orientáciou vzpery. Model Delta robota sa môže počítat Newton-Eulerovou metódou za predpokladov [15] :

- momenty zotrvačnosti vzpier sa zanedbávajú,
- pre analytické výpočty sa hmotnosti vzpier rozdeľujú na dve časti a sú umiestnené na ich vrcholoch. Pri známom vzťahu, že zotrvačnosť tuhej tyče o dĺžke  $L$  a hmotnosti  $m$  je daná  $I = \frac{1}{3} m \cdot L^2$ , potom zotrvačnosť môže byť daná  $1/3$  vzpery v dolnej časti (ako je pohyblivá platforma) a  $2/3$  v hornej časti,
- trenie a pružné účinky sa zanedbávajú.

#### 4.5.1. Parametre dynamiky

V tejto podkapitole sú uvedené parametre, ktoré sa používajú na výpočet delta robota. Na pohyblivú platformu pôsobí celková hmotnosť (4.23), a to súčet hmotností pohyblivej platformy  $m_p$ , záťaže  $m_{zat}$  a hmotností, na ktoré prispievajú 3 vzpery  $3 \cdot (1 - r) \cdot m_{vz}$ .

$$m_{pcel} = m_p + m_{zat} + 3 \cdot (1 - r) \cdot m_{vz} \quad (4.23)$$

$r$  je pomer hmotností vzpier, ktoré sa nachádzajú na ich koncoch. Ako bolo uvedené vyššie v zjednodušujúcich predpokladoch pomer hmotností  $r$  sa zvolil  $2/3$ .

Poloha ťažiska pre každé rameno sa vypočíta použitím rovnice (4.24):

$$r_{Gr} = l_r \frac{\frac{1}{2} \cdot m_r + m_k + r \cdot m_{vz}}{m_{sum}} \quad (4.24)$$

$$m_{sum} = m_r + m_k + m_{vz} \quad (4.25)$$

kde  $m_r$  je hmotnosť ramena,  $m_k$  hmotnosť kĺbu,  $m_{vz}$  hmotnosť vzpery a  $r = 2/3$ , časť  $m_{vz}$ , ktorá je umiestnená pri kĺbe.

Zotrvačnosť ramena  $I_r$  (4.26) je daná súčtom zotrvačností vytvorenou horným ramenom a zotrvačností vytvorenou koncovým bodom hmotnosti hornej časti ramena.

$$I_r = \frac{m_r}{3} \cdot l_r^2 + l_r^2 \cdot (m_k + r \cdot m_{vz}) = l_r^2 \left( \frac{m_r}{3} + m_k + r \cdot m_{vz} \right) \quad (4.26)$$

#### 4.5.2. Princíp virtuálnej práce

Virtuálna práca sústavy je výsledná práca virtuálnych síl pôsobiacich prostredníctvom reálneho posunutia alebo skutočných síl pôsobiacich cez virtuálne posunutie. Pojem posunutie môže predstavovať rotáciu alebo posuv. Pojem sila môže byť predstavovaná ako sila alebo moment. Princíp sa nevzťahuje na geometrické parametre alebo inerciálne (zotrvačné) parametre a z toho dôvodu môže byť považovaný ako základné prepojenie medzi dynamikou a kinematikou.

Každá všeobecná sila sústavy môže byť použitá ako rovnosť virtuálnych prác priradených k dvom súradnicovým systémom:

$$\tau^T \cdot \delta\theta = \tau_n^T \cdot \delta X_n \quad (4.27)$$

$\tau$  - vektor sily/momentu zodpovedajúci virtuálnemu posuvu/natočeniu  $\delta\theta$  väzby

$\tau_n$  - je sila/moment pôsobiaca na pohyblivú platformu a zodpovedajúca virtuálnemu posunutiu  $\delta X_n$  v karteziánskom systéme

Pri zavádzaní vzťahu medzi väzbovou rýchlosťou a karteziánskou rýchlosťou

$$\dot{X}_n = J\dot{\theta} \quad (4.28)$$

do rovnice (4.27) je vidieť, že Jakobiho matica môže byť použitá na prevod sily/momentu pôsobiaca v karteziánskom systéme do kĺbového systému ako  $\tau^T = \tau_n^T \cdot J$ , ktorá sa rovná  $\tau = J^T \cdot \tau_n^T$ .

Podľa tejto hypotézy sa môže robot zredukovať na 4 časti: pohyblivú platformu a tri horné ramená. Následne výpočet momentov prípadne síl pôsobiacich na pohyblivú platformu môžu byť prenesené do kĺbového systému pomocou Jacobiánu podľa princípu virtuálnej práce, ako je uvedené vyššie.

#### 4.5.3. Výpočet dynamického modelu založený na princípe virtuálnych prác

Dva druhy síl pôsobia na pohyblivú platformu: Gravitačná sila  $G_n$  (4.29) a zotrvačná sila (d'Alembert)  $F_n$  (4.30). Tieto dve sily sú dané vzťahom:

$$G_n = m_{pcel} \cdot (0 \quad 0 \quad -g)^T \quad (4.29)$$

$$F_n = m_{pcel} \cdot \ddot{X}_n \quad (4.30)$$

Tieto dve sily v kĺbovom systéme sa potom môžu vypočítat' transpozíciou Jakobiho matice, ako je popísané v kapitole 4.5.3.

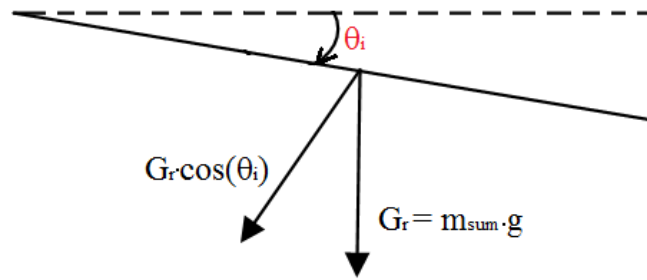
$$\tau_n = J^T \cdot F_n = J^T \cdot m_{pcel} \cdot \ddot{X}_n \quad (4.31)$$

$$\tau_{Gn} = J^T \cdot G_n = J^T \cdot m_{pcel} \cdot (0 \quad 0 \quad -g)^T \quad (4.32)$$

Dva druhy momentov pôsobia na kĺby, ktoré ovládajú každé rameno. Moment  $\tau_{Gr}$  (4.33) vytváraný gravitačnou silou každého ramena a moment  $\tau_r$  tvorený silou zotrvačnosti (d'Alembert) pôsobiaca na každé rameno.

Gravitačné pôsobenie možno vypočítat' ako silu, ktorá pôsobí z ťažiska kolmo na rameno, ako je znázornené na obr. (4.17).





Obr. 4. 18 Gravitačná sila na ramene Delta robota

$$\tau_{Gr} = r_{Gr} \cdot G_r \cdot (\cos\theta_1 \quad \cos\theta_2 \quad \cos\theta_3)^T, \quad (4.33)$$

kde  $G_r$  je gravitačná sila pôsobiaca na ťažisko každého horného ramena. Moment každého ramena pôsobiacich vo väzbách môže byť vyjadrený:

$$\tau_r = I_r \cdot \ddot{\theta}, \quad (4.34)$$

kde  $I_r$  je matica zotrvačnosti ramien v kĺbovom systéme a je daná vzťahom:

$$I_r = \begin{bmatrix} I_{r1} & 0 & 0 \\ 0 & I_{r2} & 0 \\ 0 & 0 & I_{r3} \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Podľa d'Alembert princípu všetky zotrvačné sily sa musia rovnať všetkým nezotrvačným silám [16], potom platí:

$$\tau + \tau_{Gn} + \tau_{Gr} = \tau_r + \tau_n, \quad (4.36)$$

kde  $\tau$  je vektor momentov, ktoré majú byť použité na troch riadiacich väzbách.  $\tau_n$  obsahuje výraz  $\ddot{X}_n$ , ktorý sa vypočíta druhou deriváciou kĺbových súradníc podľa času, t.j

$$\ddot{X}_n = \frac{d^2 f(\theta)}{dt^2} \quad (4.37)$$

Nato po dosadení a úprave rovnice (4.36) sa dostane

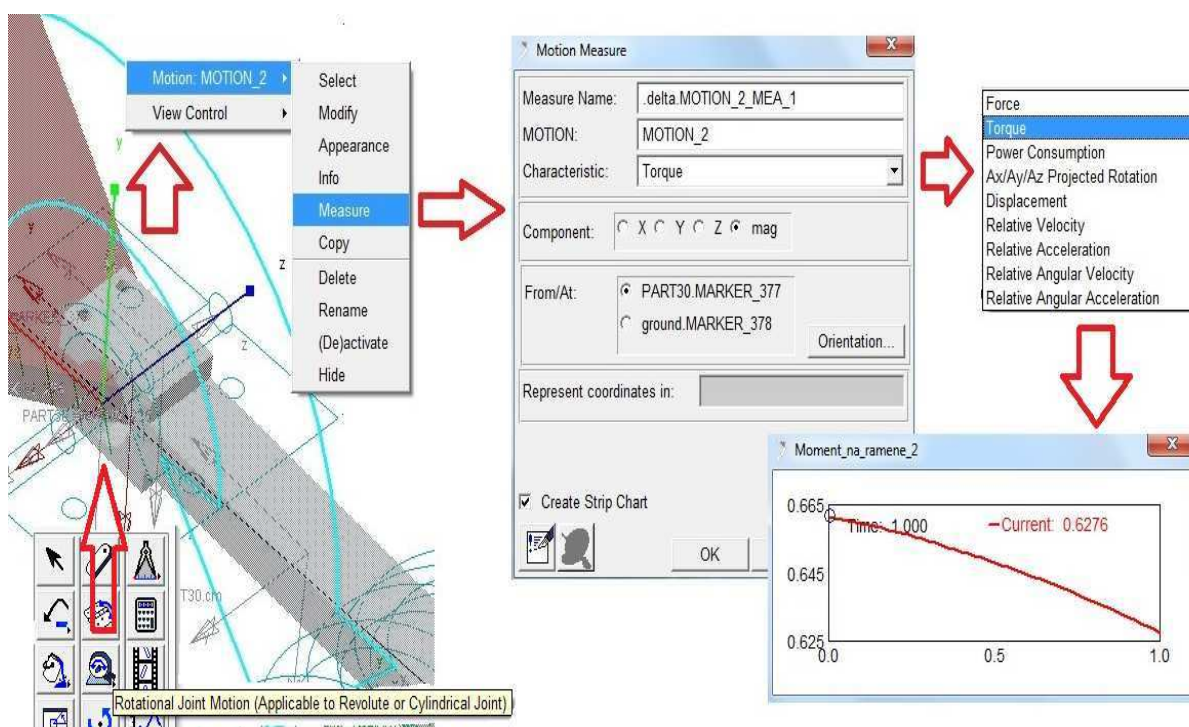
$$\tau = \mathbf{A}(\theta)\ddot{\theta} + \mathbf{C}(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + \mathbf{G}(\theta), \quad (4.38)$$

kde  $\mathbf{A}$  je matica zotrvačnosti,  $\mathbf{C}$  popisuje výpočet odstredivej a Coriolisovej sily a  $\mathbf{G}$  obsahuje gravitačné sily pôsobiace na manipulátor.

#### 4.5.4. Dynamika modelu v programe MSC Adams

##### Inverzná úloha dynamiky

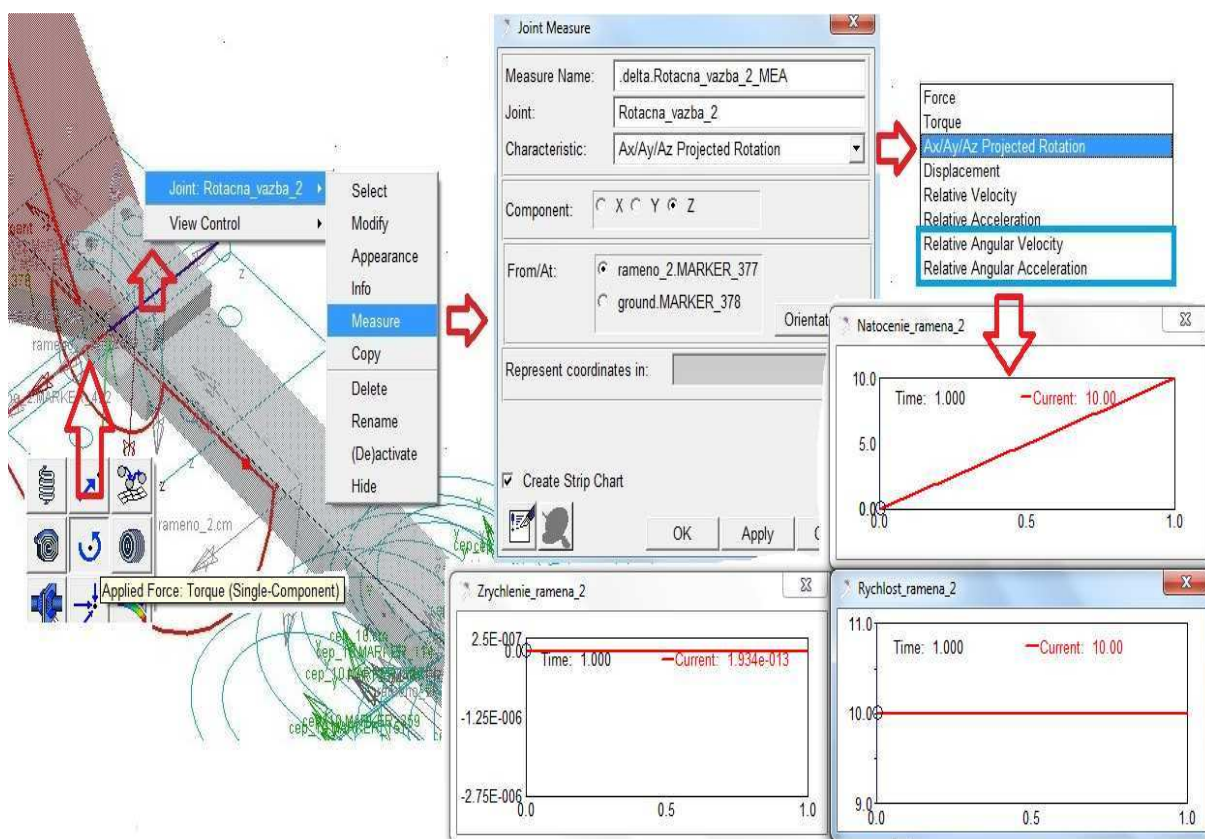
Na obrázku (4.19) je znázornený výpočet inverznej dynamiky v programe MSC Adams. Sila, v našom prípade moment, sa vypočíta tak, že na pohone (general point motion), ktorý ovláda natáčanie o  $\theta$ , rýchlosť natáčania, či zrýchlenie ramena, sa vytvorí merač (measure) momentu. V zobrazenom okne merania sa nastavuje typ merača na Torque (moment) a zložka na mag, pretože tento merač meria voči globálnemu súradnicovému systému a model je priestorovo natočený.



Obr. 4. 19 Meranie momentu/sily v programe MSC Adams

##### Priama úloha dynamiky

Priama úloha dynamiky sa v tomto programe počíta tak, že miesto pohonu (Rational join motion) sa použije sila respektíve moment, ktorý bude pôsobiť v rotačnej väzbe na rameno. Natočenia, rýchlosti a zrýchlenia sa získajú podobne ako pri meraní momentu v inverznej dynamike s tým rozdielom, že sa použije merač (measure) na rotačnú väzbu, kde sa zvolia požadované kinematické veličiny.



Obr. 4. 20 Meranie vektorových veličín v programe MSC Adams

## 4.6. Trajektória

*Trajektória* je cesta, ktorá nasleduje objekt v priestore alebo môže byť definovaná ako dráha + čas, t.j. určuje, kedy má byť objekt, v ktorom mieste dráhy [17]. V robotike môže byť objekt koniec kinematického reťazca pre sériový robot a u delta robota pohyblivá platforma prípadne koncový efektor, ak je pripojený na platformu. Pohyb môže byť lineárny, kvadratický alebo kubický. Pre pohyb sa ďalej určuje, aká rýchlosť má byť na začiatku a na konci, či má byť po celej dráhe konštantná rýchlosť alebo má byť dráha prekonaná za minimálny čas.

### 4.6.1. Trajektória s požadovanou počiatkovou a koncovou rýchlosťou

Jeden zo spôsobov ako vytvoriť hladkú trajektóriu pre objekt je napríklad čas histórie požadovaných súradníc koncového efektora získaný podľa polynómu [18]. V tomto prípade existuje niekoľko obmedzení ako sú požadované počiatkové a koncové rýchlosti. Ak je premenná  $X$  vektor, ktorý popisuje súradnice  $(x, y, z)$  pozície pre koncový efektor, potom sa predpokladá, že pre objekt v čase  $t_0$  platí:

$$\begin{aligned} X(t_0) &= X_0 \\ \dot{X}(t_0) &= \dot{X}_0 \end{aligned} \tag{4.39}$$

a v konečnom čase  $t_f$  platí:

$$\begin{aligned} X(t_f) &= X_f \\ \dot{X}(t_f) &= \dot{X}_f \end{aligned} \tag{4.40}$$

Týmto vzniknú štyri podmienky vytvorené polynómom, ktorý obsahuje štyri nezávislé koeficienty. Takto sa získa kubická trajektória v tvare

$$X_p(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3, \tag{4.41}$$

kde  $X_p(t)$  je požadovaná (x, y, z) pozícia v čase t.

Potom generovaná rýchlosť, ktorá má spĺňať počiatočné a koncové podmienky, bude daná deriváciou  $\dot{X}_p$  ako

$$\dot{X}_p(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 \tag{4.42}$$

Ďalšou deriváciou sa získa zrýchlenie a rovnica bude mať tvar

$$\ddot{X}_p(t) = 2a_2 + 6a_3 t \tag{4.43}$$

Štyri nezávislé koeficienty  $a_0$   $a_1$   $a_2$   $a_3$  možno vypočítať kombináciou rovníc (4.41) a (4.42) a štyrmi podmienkami (4.39) a (4.40). Týmto sa vytvoria štyri rovnice o štyroch neznámych, ktoré môžu byť napísané v maticovej forme.

$$\begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 \\ 1 & t_f & t_f^2 & t_f^3 \\ 0 & 1 & 2t_f & 3t_f^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ \dot{X}_0 \\ X_f \\ \dot{X}_f \end{bmatrix} \tag{4.44}$$

Môže byť preukázané, že determinant matice 4x4 koeficient v rovnici (4.44) je  $(t_f - t_0)^4$ . Toto poukazuje, že rovnica (4.44) má vždy riešenie, ak platí  $t_0 \neq t_f$  [18]. Nakoniec určením  $t_0$ ,  $t_f$  a štyroch podmienok riešenie trajektórie sa dá vypočítať ako

$$X_p(t) = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 + a_3(t - t_0)^3, \tag{4.45}$$

kde  $a_0 = X_0$  a  $a_1 = \dot{X}_0$  potom

$$a_2 = \frac{3(X_1 - X_0) - (2\ddot{X}_0 + \dot{X}_1)(t_f - t_0)}{(t_f - t_0)^4} \tag{4.46}$$

$$a_3 = \frac{2(X_0 - X_{01}) - (\ddot{X}_0 + \ddot{X}_1)(t_f - t_0)}{(t_f - t_0)^3} \quad (4.47)$$

Rovnica (4.45) sa dá tiež použiť na plánovanie pohybu medzi jednotlivými bodmi. Napríklad konečná hodnota pre pohyb do  $i$ -teho bodu sa použije ako počiatočná hodnota pre pohyb do  $(i + 1)$  bodu a tak ďalej.

## 5. Analýza správania manipulátora pre vybrané pracovné režimy

Táto kapitola sa zaoberá analýzou správania sa delta manipulátora pre dané pracovné režimy, t.j. zadaním dráhy, po ktorej sa má koncový efektor pohybovať a prekonať ju za určitý čas. Výsledkom skúmania majú byť časové priebehy veličín, ako sú napríklad momenty, natáčanie ramien, rýchlosti atď. Významom merania simulovaného manipulátora je zisťovanie vhodnosti použitia už reálneho modelu v zadaných pracovných režimoch v reálnom prostredí.

### 5.1. Simulácia v MSC Adams

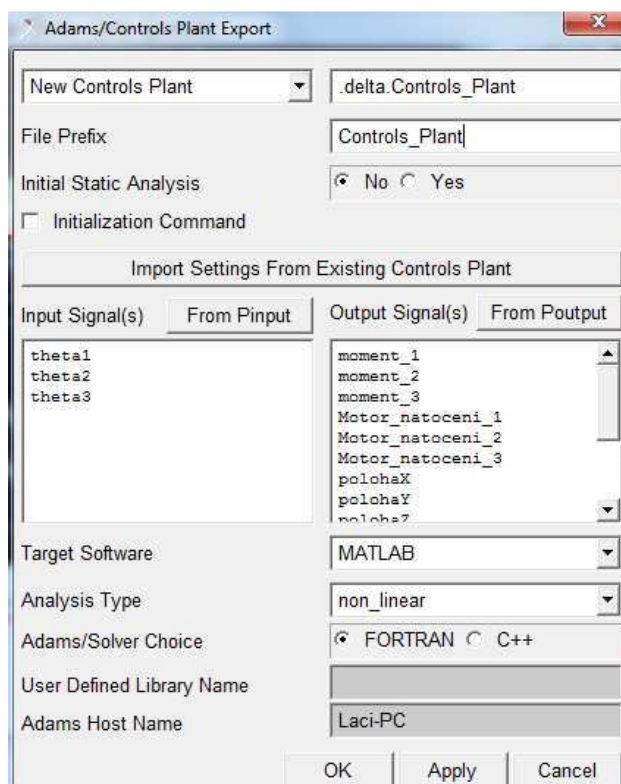
Simulovanie modelu v tomto programe sa dá niekoľkými spôsobmi. Jeden spôsob výpočtu modelu je zobrazený v kapitole 4.4.3 Kinematika modelu v programe MSC Adams alebo v kapitole 4.5.4. dynamika modelu v programe MSC Adams. Ako je už spomenuté v uvedených kapitolách sa definuje pohyb ramien pomocou *rotational point motion*, prípadne *torque* (priama kinematika) alebo pohyb pohyblivej platformy pomocou *general point motion* (nepriama úloha). Nevýhodu tohto spôsobu nachádza používateľ pri definovaní trajektórie z dôvodu nutnosti písania zdĺhavého príkazu a pre každý pohon iného. Navyše sa nedá tento príkaz použiť pre ľubovoľnú trajektóriu, respektíve pri každej novej trajektórii je potrebné meniť tieto príkazy a ešte k tomu ich správne načasovať. Príkazy na plánovanie trajektórie môžu byť napríklad *STEP*, čo je ako v matlabe príkaz *jtraj* alebo *SHF*, čo je v matlab/simmechanic vyjadrené ako blok *SinWave*, ktorý generuje sinusový signál fungujúci podľa rovnice ( $x = amp \cdot (freq \cdot time + fáza) + vych$ ). Výhodou tohto spôsobu simulácie je nepotreba vedieť vzorce pre kinematiku a dokáže priamo graficky určiť polohu efektora, prípadne natočenie jednotlivých ramien.

Ďalej sa dá testovať model pomocou *Design Variable*, kde sa zadávajú vzorce na výpočet premenných potrebných na výpočet kinematiky. V tomto prevedení sa počíta priama či inverzná kinematika pomocou vzorcov a tie sa ďalej posielajú do modelu, respektíve do pohonov. Simulácia v podstate prebieha tým istým spôsobom ako je uvedené vyššie len s tým rozdielom, že cez *Design Variable* pri inverznej úlohe nemožno zadať pohyb koncového efektora cez funkciu (*STEP*, *SHF*) a z tohto dôvodu sa nedá plánovať zložitá dráha.

## 5.2. Simulácia pomocou co-simulácie

Co-simulácia predstavuje spoluprácu jednotlivých simulačných prostriedkov, ako sú MSC Adams a Matlab/Simulink. Záverečná práca sa zaoberá zisťovaním jednotlivých charakteristík pre zvolené pracovné režimy delta manipulátoru pomocou co-simulácie.

Na vytvorenie co-simulácie je potrebné najprv v adamsse povoliť funkciu „control“ v *plugin manager*. ADAMS/Control kombinuje výhody ADAMS samotného (zostavovanie a simulácie komplexných multi-body dynamických sústav) s výhodami iných balíčkov, ktoré sa špecializujú na ovládanie modelu ako Matlab/Simulink a EASY5. ADAMS/Controls a programy MSC.EASY5 and MATLAB sa dorozumievajú pomocou stavových premenných (state variables). Z tohto dôvodu je potrebné tieto stavové premenné definovať a rozlíšiť ich na vstupné a výstupné stavové premenné. Vstupné stavové premenné sa zapisujú do pohonov pomocou príkazu *VARVAL* (znamená VARiable VALue – funkcia, ktorá vracia Adams hodnotu danej premennej). Pre tento prípad sa vo vykonanej simulácii volilo 15 premenných, a to uhol natočenia ramena, uhlová rýchlosť, uhlové zrýchlenie pre každé rameno, moment pre každý pohon ovládajúce ramená a pozícia ťažiska pohyblivej platformy v jednotlivých osách.

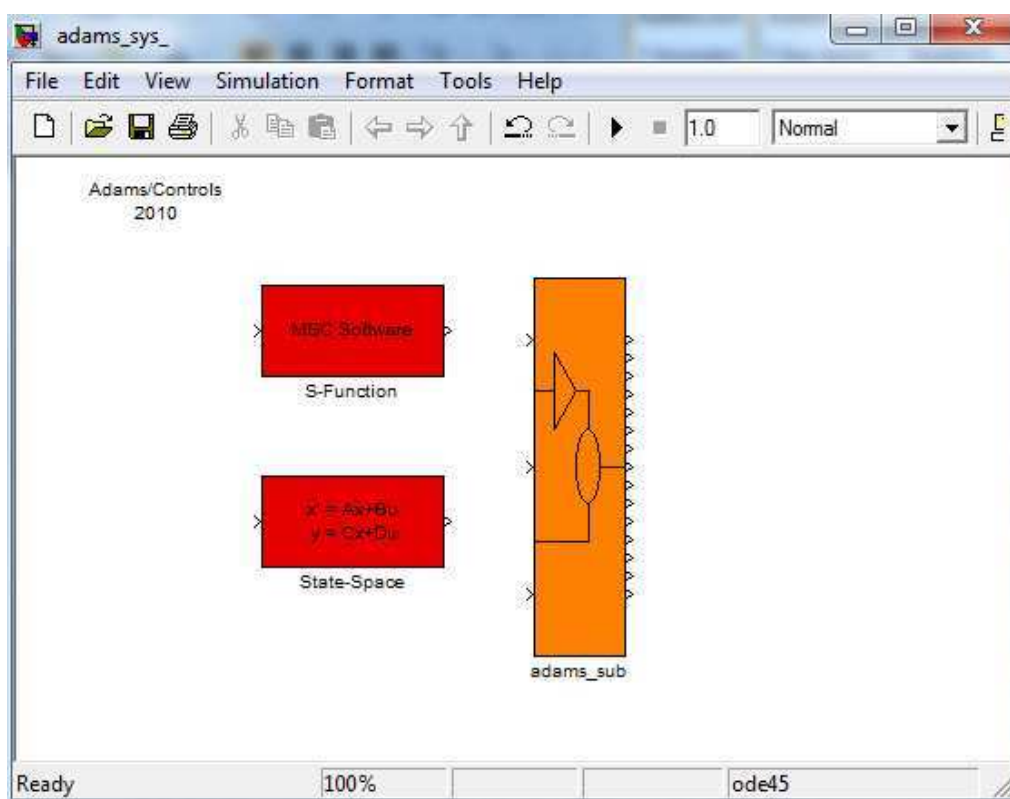


Obr. 5. 1 Adams/Control definovanie vstupov a výstupov

V programe MSC Adams (obr. 5.1) sa po definovaní vstupov a výstupov, model exportováva do formátu, ktorý je možný načítať v riadiacich aplikáciách. V tomto prípade ide o

Matlab/Simulink. Vygenerujú sa štyri súbory, ktoré tri používa ADAMS pre simuláciu a jeden Matlab (m-file), ktorý obsahuje všetky informácie o systéme (vstupy, výstupy, názvy súborov, atď.). Po zadaní príkazu *adam\_sys* v m-file sa vygeneruje simulinkovský model (obr. 5.2), ktorý obsahuje 3 bloky s rôznymi reprezentáciami mechanického systému exportovaného z programu MSC.ADAMS:

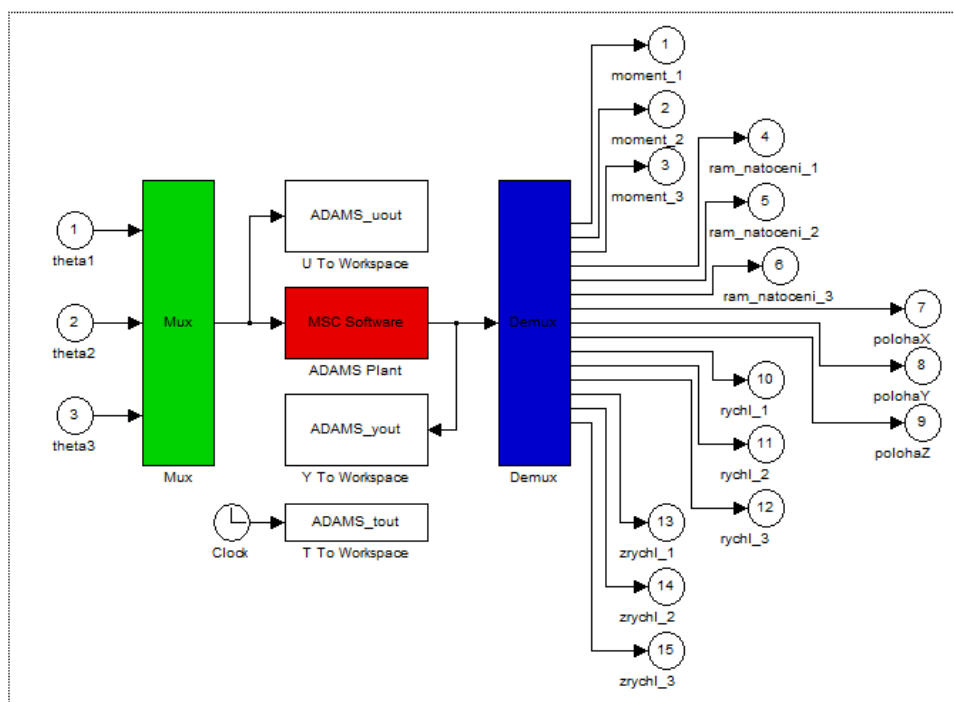
- **S-Function** - reprezentujúci nelineárny model,
- **adams\_sub** - reprezentujúci nelineárny model s pridanými ďalšími užitočnými premennými,
- **State-Space** - reprezentujúci linearizovanú sústavu vo forme stavových matíc A, B, C, D.



Obr. 5. 2 Súbor adams\_sys\_.mdl

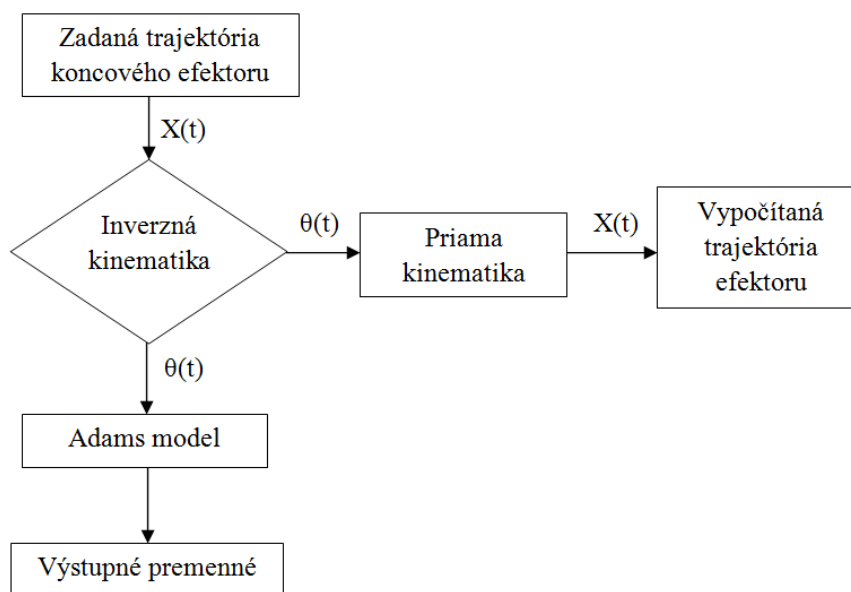
Nakoľko sa model exportoval z Adamsu ako nelineárny, v diplomovej práci sa použil na výpočet veličín blok *adams\_sub*. Vstupy do bloku a výstupy z bloku obsahujú také isté informácie ako sa predpisovali v MSC Adams (obr. 5.3). Pre správnu komunikáciu Matlabu s Adamsom je potrebné nastaviť parametre, ako sú *názvy súborov*, do ktorých sa budú ukladať výsledky simulácie, *časový interval*, v ktorom medzi sebou oba programy majú komunikovať, *mód animácie* (batch, interactive), *spôsob komunikácie* (PIPE, TCP/IP) medzi programami, *simulačný mód* (discrete, continuous), atď.





Obr. 5. 3 Subsystem modelu vytvorený programom MSC Adams

Pri spustení simulácie si oba programy vymieňajú dáta prostredníctvom vstupov a výstupov (tzv. stavových veličín) pre výpočet modelu. Vypočítané hodnoty sa ukladajú v prostredí *workspace* v programe Matlab. Tieto hodnoty môžu byť nájdené v poliach *ADAMS\_tout*, *ADAMS\_yout* a *ADAMS\_uout*. Priebeh simulácie sa vykonáva podľa nasledujúcej blokovej schémy znázorňujúcej na obrázku (5.4).



Obr. 5. 4 Bloková schéma znázorňujúca tok informácií

Z obrázku (5.4) je zrejmé, že najprv sa zadávala počiatočná a požadovaná poloha, prípadne dráha koncového efektora, ktorá mala byť prekonaná za určitý čas. V programe Matlab následne prebiehal výpočet inverznej kinematiky, ktorej výsledkom boli natočenia jednotlivých ramien potrebné na dosiahnutie zadanej polohy a zároveň boli určené ako vstupné premenné do programu MSC Adams. Pomocou priebehov natočenia získaných z inverznej kinematiky sa za pomoci priamej kinematiky overovala správnosť výpočtu. Po vstupe vstupných premenných do programu MSC Adams mohla prebiehať simulácia a prostredníctvom výstupných hodnôt sa mohlo skúmať správanie modelu.

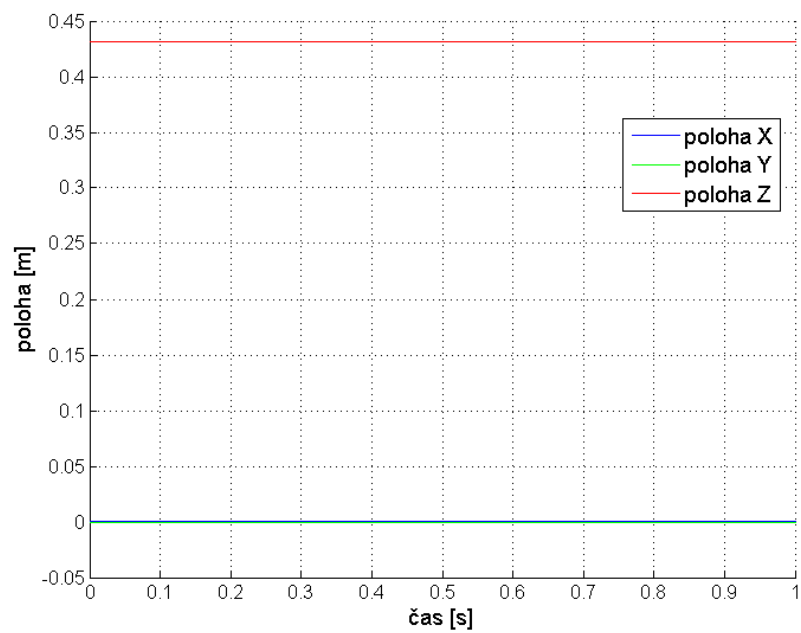
### **5.3. Simulácia Delta modelu ako s tuhým prvkom**

Cieľom simulácie pre delta manipulátor je získanie vlastností správania sa manipulátora. Toto pozorovanie sa uskutočňovalo v rôznych pracovných režimoch. Najprv sa skúmala statická analýza, potom jednoduchý pohyb, tak že zadáním súradníc koncového efektora sa priamočiarym pohybom dosiahla požadovaná poloha. Každá táto simulácia na zistenie závislosti momentov na hmotnosti sa vykonávala najprv bez záťaže, následne s 1 kg záťažou a nakoniec s 10 kg záťažou. Dôvodom voľby týchto hmotností sú nasledovné skutočnosti, ktoré získala firma ABB svojím skúmaním a analýzou na vlastnom výrobku:

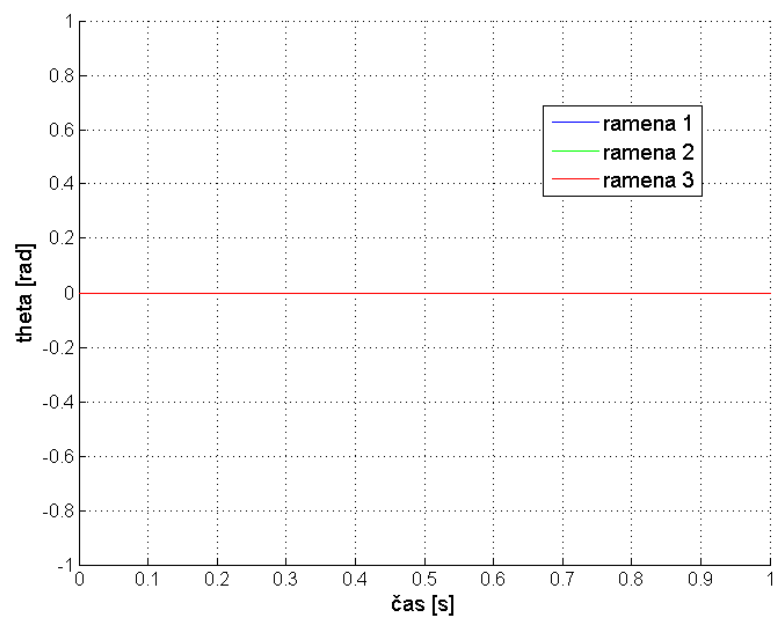
- Nulová záťaž = výborné vlastnosti manipulácie,
- 1 kg záťaž = ešte uspokojujúce vlastnosti manipulácie,
- 10 kg záťaž = neuspokojujúce vlastnosti manipulácie.

#### **5.3.1. Statická analýza**

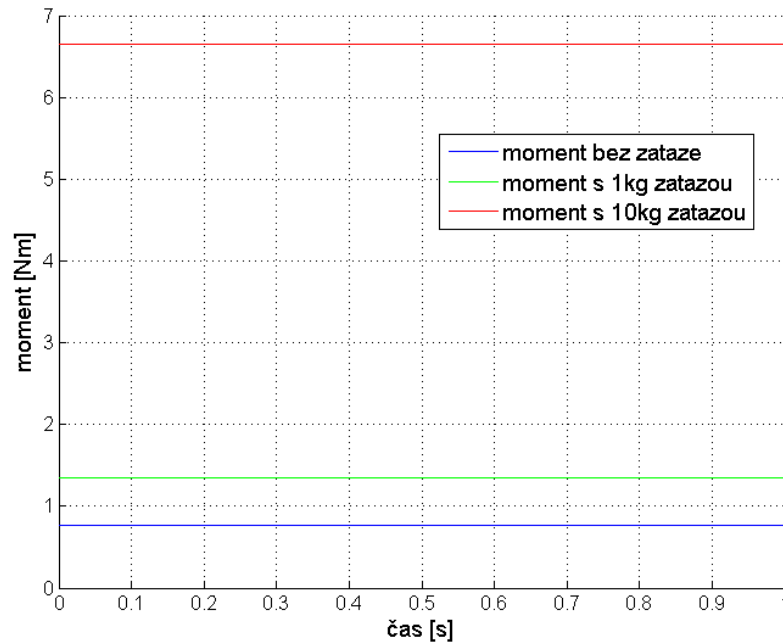
Statická analýza popisuje správanie sa manipulátora v základnej polohe. Delta robot nevykonáva žiadny pohyb, respektíve ramená sa vôbec nenatáčajú (obr. 5.6). Výsledkom skúmania sú momenty, ktoré musia pôsobiť v pohonoch, aby sa zachovala táto rovnovážna poloha. Nakoľko sa ramená nenatáčajú, je zrejmé, že uhlové rýchlosti a zrýchlenia každého ramena budú nulové a poloha koncového efektora bude v každom okamžiku konštantná. Potom bude zachovaná vzdialenosť polohy koncového efektora od počiatku a bude mať súradnice  $E = [0 \ 0 \ 0.4315]$  metrov (obr. 5.5).



Obr. 5. 5 Dráha efektora pri statickej analýze



Obr. 5. 6 Priebeh natočenia ramien pri statickej analýze

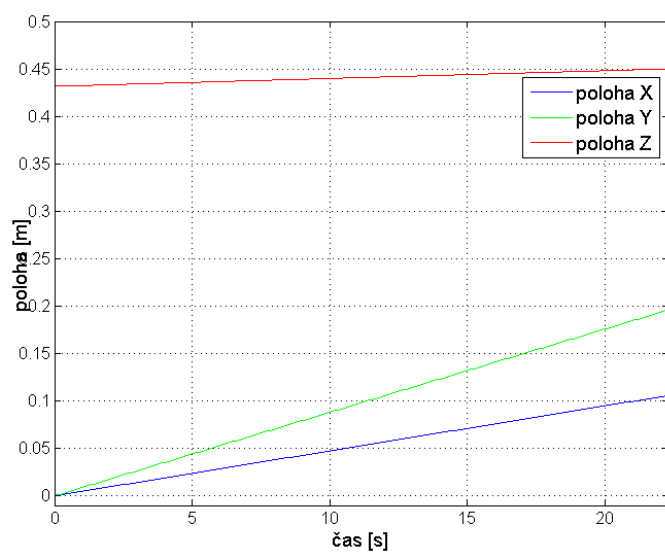


Obr. 5. 7 Priebeh momentov v statickej analýze

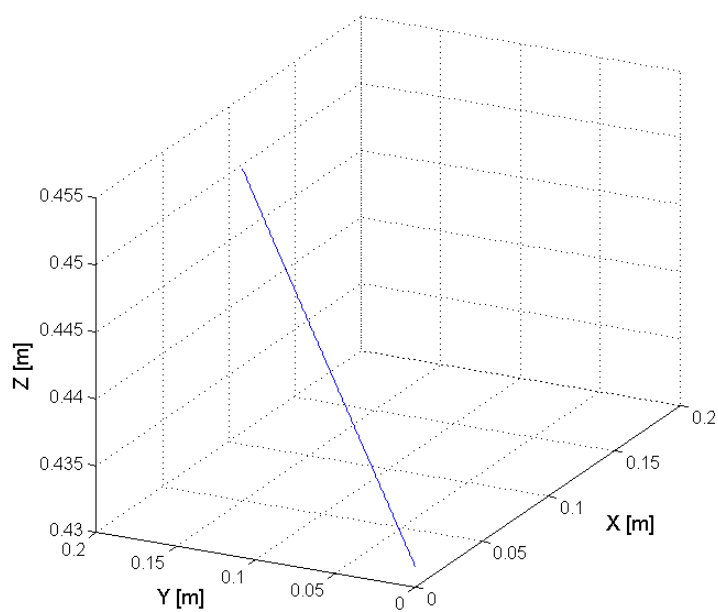
Na obrázku (5.7) sú zobrazené výstupné hodnoty momentov, ktoré sú potrebné na zachovanie manipulátora v základnej polohe (natočenie ramien  $\theta_i = 0$  [rad]) pri daných použitých zaťaženiach. Z pozorovania je vidieť, že pri pripevnení väčšej záťaže, je potrebné pôsobenie väčších momentov v pohonoch. Nakoľko manipulátor nevykonáva žiadny pohyb, momenty ostávajú po celý čas simulácie rovnaké.

### 5.3.2. Jednoduchá trajektória

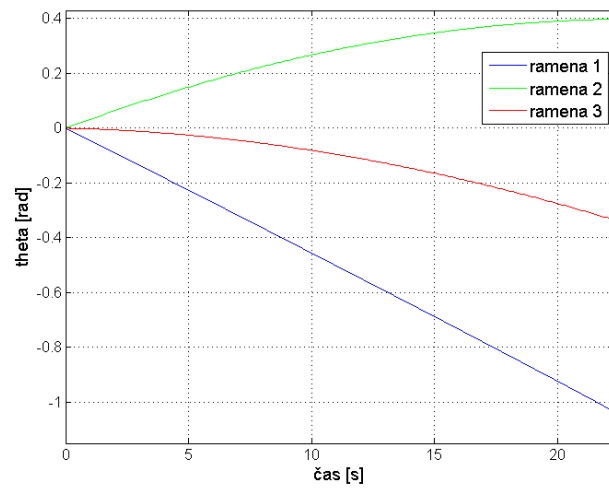
Simulácia modelu prebieha v troch režimoch, tak ako pri statickej analýze, a to keď je koncový efektor bez záťaže, s 1 kg záťažou a nakoniec s 10 kg záťažou. Na rozdiel od statickej analýzy, teraz koncový efektor vykonáva priamočiary pohyb o konštantnej rýchlosti  $v = 0.5$  [m/s<sup>2</sup>], kde počiatočná poloha efektora sa zadávala  $E_0 = [0 \ 0 \ 0.4315]$  metrov, čo je základná poloha efektora a koncová poloha bola stanovená na  $E_p = [0,1 \ 0,2 \ 0.45]$ . Na obrázkoch (5.8) a (5.9) je znázornený pohyb koncového bodu a je zrejmé, že efektor pri stálej rýchlosti vykonáva lineárny pohyb, respektíve konštantne narastá vzdialenosť objektu od počiatočnej polohy vo všetkých zložkách.



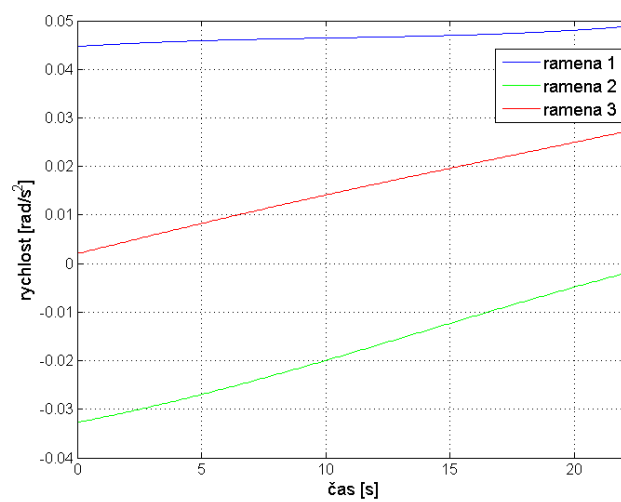
Obr. 5. 8 Súradnice efektora v jednotlivých osách



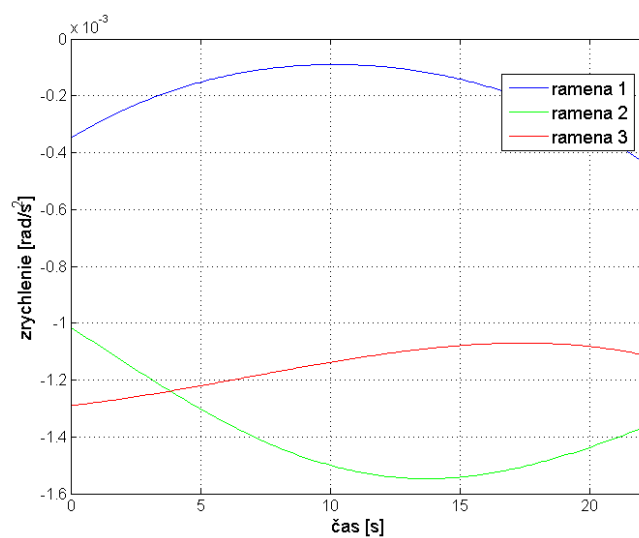
Obr. 5. 9 Dráha efektora zobrazená v priestore



Obr. 5. 10 Priebek natočenia ramien pri danej trajektórie

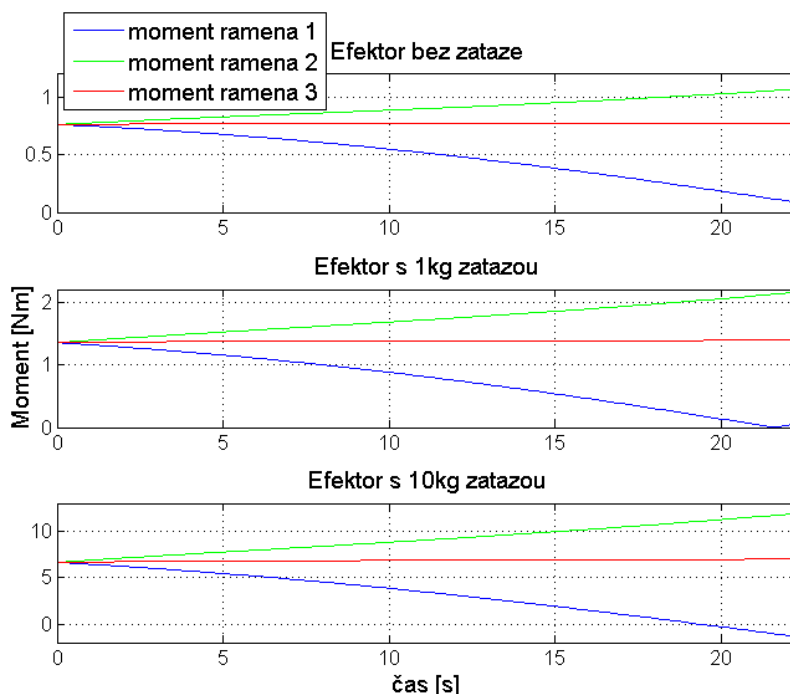


Obr. 5. 11 Priebek uhlovej rýchlosti pri danej trajektórie



Obr. 5. 12 Priebek uhlového zrýchlenia pri danej trajektórie

Na obrázkoch (5.10) až (5.12) sú zobrazené priebehy natočenia ramien, ich rýchlosť a zrýchlenie natáčania potrebné na zachovanie priamočiareho posuvu efektora pri konštantnej rýchlosti  $v = 0.5 \text{ m/s}^2$ .



Obr. 5. 13 Priebeh momentov pre jednotlivé zaťaženia

Táto sústava grafov zobrazuje priebehy momentov v čase, ktoré sú potrebné pri natočeniach ramien, ich rýchlosti a zrýchlenia natáčania, aby mohol koncový objekt vykonávať priamočiary pohyb o stálej rýchlosti. V prvej charakteristike je uvedený moment, potrebný pri nepoužití záťaže a v ďalších charakteristikách je zobrazený moment potrebný pre jednotlivé záťaže, a to konkrétne pre 1 kg záťaž a 10 kg záťaž. Z výsledkov je vidieť, že priebehy momentov sú rovnaké pre každý pracovný režim. Rozdielom je iba vo veľkosti pôsobenia momentov pre dané zaťaženia.

#### 5.4. Simulácia Delta modelu s pružnými prvkami [19]

Motiváciou pre zohľadnenie pružných vlastností telies pri dynamických simuláciách virtuálneho prototypu je rozhodujúca miera ich vplyvu na prevádzkové parametre virtuálneho prototypu ako aj na spoľahlivé určenie časovej histórie dynamického zaťaženia pružných telies potrebnej pre ich dimenzovanie a predikciu ich životnosti.

Craig a Bampton navrhli metódu syntézy tvarov (CMS) pružného telesa, ktorá umožňuje reprezentovať pružné teleso syntézou tvarov (Mode Shapes) ako modálne pružné teleso (MFB). V prostredí programu MSC.ADAMS je modálne pružné teleso vo forme modelovacieho prvku Flex\_Body, ktorý sa dá pripojiť na susedné tuhé, alebo pružné telesá s prvkami geometrických väzieb. Modálne pružné teleso je v porovnaní s doterajšou reprezentáciou pružného telesa súborom MNF v prostredí MKP programu vhodnejšie na:

- realizáciu úsporných dynamických simulácií v sústave s ostatnými pružnými, alebo tuhými telesami s veľkými (nelineárnymi) premiestneniami v porovnaní so svojimi rozmermi, lebo má verné dynamické vlastnosti pružného telesa, ale s výpočtovo úsporným menším počtom stupňov voľnosti pohybu,
- na dynamické simulácie veľkých deformácií telesa v porovnaní so svojimi rozmermi vo forme sústavy modálnych pružných telies, pri ktorých sa prejavuje zvyšovanie tuhosti pružného telesa v dôsledku jeho zotrvačných vlastností,
- na výpočtovo efektívnu reprezentáciu pružného telesa vo vymedzenom frekvenčnom rozsahu, lebo umožňuje uskutočniť vhodnú modálnu redukciu s malým počtom stupňov voľnosti pohybu,
- na ľubovoľné nastavovanie tlmenia pre jednotlivé vlastné tvary formou pomeru s kritickým tlmením,
- na realizáciu intuitívnych, alebo cielených zmien vlastností pružného telesa podľa výsledkov experimentálnych modálnych meraní po dosiahnutí vyžadovaného stupňa korelácie.

#### **5.4.1. Pružné telesá v programe MSC Adams**

Pre následnú MBS simuláciu je vytvorený model delty s pružnými vzperami (obr. 5.17) pomocou metódy modálnej syntézy – Craig-Bamptonova [20] metóda. Craig-Bamptonova metóda je účinný nástroj pre syntézu modálnych reprezentácií, ktoré vyjadrujú požadovaný vplyv uchytenia a požadovanú úroveň dynamických vlastností.

Reálne pružné teleso je kontinuum s nekonečne veľkým počtom stupňov voľnosti pohybu. Diskretizáciou reálneho pružného telesa vznikla konečno-prvková aproximácia pružného telesa s konečným, ale veľkým počtom DOF. Modálne pružné teleso je výpočtovo úspornejšia reprezentácia konečno-prvkového pružného telesa, lebo malé lineárne deformácie konečno-prvkového telesa (voči rozmerom telesa), reprezentované vektorom  $\bar{u}$  premiestnení uzlov voči lokálnemu vzťažnému systému nahradíme súčtom súčinov (lineárnou kombiná-



ciou) počtu  $m$  vlastných vektorov (alebo modálnych tvarov)  $\phi_i$  s modálnymi súradnicami  $q_i$ , ktoré v uzloch odpovedajú amplitúdam modálnych tvarov:

$$\bar{u} = \sum_{i=1}^m \phi_i q_i \quad (5.1)$$



Obr. 5. 14 Delta manipulátor s pružnými telesami

Modálne tvary sú počítané pomocou MKP modelu, na ktorom sú vytvorené tzv. interface nody (attachment nodes). Tieto nody slúžia na zadanie zaťaženia a okrajových podmienok v následnom MBS modeli. Modálne tvary  $\phi$  popisujú statické i dynamické vlastnosti poddajného telesa. Sú zložené z:

### Constraint modes

– tieto modálne tvary sú statické tvary získané výpočtami tak, že v každom uzle telesa vo väzbe (DOF) postupne predpíšeme jednotkové premiestnenie (DOF) telesa vo väzbe a uzly v ostatných väzbách zostávajú fixované (ukotvené). Celkový počet väzobných modálnych tvarov je daný počtom väzobných uzlov (boundary nodes) násobených 6 DOF. Väzobné modálne tvary zachytávajú všetky možné premiestnenia (DOF) telesa vo väzbe s jednoznačnou reláciou medzi modálnymi súradnicami  $q_C$  väzobných modálnych tvarov a premiestneniami  $u_B$  (DOF) telesa vo väzbe.

$$q_C = u_B \quad (5.2)$$

## Fixed-boundary normal modes

– tieto vlastné tvary dosiahneme ukotvením (fixovaním) pružného telesa v mieste väzby a určením vlastných tvarov modálnou analýzou telesa. Potrebné množstvo vlastných tvarov definuje používateľ podľa vyžadovaného stupňa vernosti vlastností náhrady pružného telesa. Tieto tvary definujú „modálnu expanziu“ štruktúry vnútorných DOF (medzi väzobnými DOF). Fyzikálna vernosť vlastností pružného telesa a s tým súvisiaci frekvenčný rozsah použitia modelu pružného telesa je úmerná počtu vlastných tvarov definovaných užívateľom.

Vzťah medzi fyzikálnymi premiestneniami (DOF), Craig-Bamptonovými modálnymi tvarmi a modálnymi súradnicami je vyjadrený rovnicou:

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} \mathbf{u}_B \\ \mathbf{u}_I \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \Phi_{IC} & \Phi_{IN} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_C \\ \mathbf{q}_N \end{Bmatrix} \quad (5.3)$$

Kde

$\mathbf{u}_B$  – väzobné premiestnenia (DOF)

$\mathbf{u}_I$  – vnútorné premiestnenia (DOF)

$\mathbf{I}, \mathbf{0}$  – jednotková a nulová matica

$\Phi_{IC}$  – fyzikálne premiestnenia telesa v miestach vnútorných uzlov pri väzobných modálnych tvaroch s jednotkovým posunutím

$\Phi_{IN}$  – fyzikálne premiestnenia telesa v miestach vnútorných uzlov pri väzobných modálnych tvaroch s ukotvením telesa vo väzbách

$\mathbf{q}_C$  – modálne súradnice väzbových modálnych tvarov s jednotkovým posunutím

$\mathbf{q}_N$  – modálne súradnice väzbových modálnych vlastných tvarov s ukotvením telesa vo väzbách

Na základe týchto skupín módov sa zostaví transformačná matica, pomocou ktorej sa zredukuje matica hmotnosti (5.4) a matica tuhosti (5.5). Tým sa zníži počet stupňov voľnosti na hodnotu zodpovedajúcu počtu vybraných *Fixed-boundary normal modes* a *Constraint modes*.

$$\hat{\mathbf{M}} = \Phi^T \mathbf{M} \Phi = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \Phi_{IC} & \Phi_{IN} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{BB} & \mathbf{M}_{BI} \\ \mathbf{M}_{IB} & \mathbf{M}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \Phi_{IC} & \Phi_{IN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{M}}_{CC} & \hat{\mathbf{M}}_{NC} \\ \hat{\mathbf{M}}_{CN} & \hat{\mathbf{M}}_{NN} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$\hat{\mathbf{K}} = \Phi^T \mathbf{K} \Phi = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \Phi_{IC} & \Phi_{IN} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{BB} & \mathbf{K}_{BI} \\ \mathbf{K}_{IB} & \mathbf{K}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \Phi_{IC} & \Phi_{IN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{K}}_{CC} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \hat{\mathbf{K}}_{NN} \end{bmatrix}, \quad (5.5)$$

kde písmeno I označuje vnútorné DOF, B väzobné DOF, N väzobné vlastné tvary s ukotvením a C väzobné tvary s jednotkovým posunutím.  $\hat{\mathbf{M}}$  je zovšeobecnená matica hmotnosti a  $\hat{\mathbf{K}}$  zovšeobecnená matica tuhosti.

Rovnice (5.4) a (5.5) majú niekoľko vlastností:  $\hat{\mathbf{M}}_{NN}$  a  $\hat{\mathbf{K}}_{NN}$  sú diagonálne matice pretože sú priradené vlastným vektorom.  $\hat{\mathbf{K}}$  je blokovo diagonálna matica. Medzi ukotvenými väzobnými vlastnými tvarmi a väzobnými tvarmi s jednotkovým posunutím neexistuje tuhostná väzba. naopak,  $\hat{\mathbf{M}}$  nie je blokovo diagonálna, pretože existuje (zotrvačná) väzba medzi uvedenými vlastnými tvarmi.

#### 5.4.2. Tvorba pružného telesa

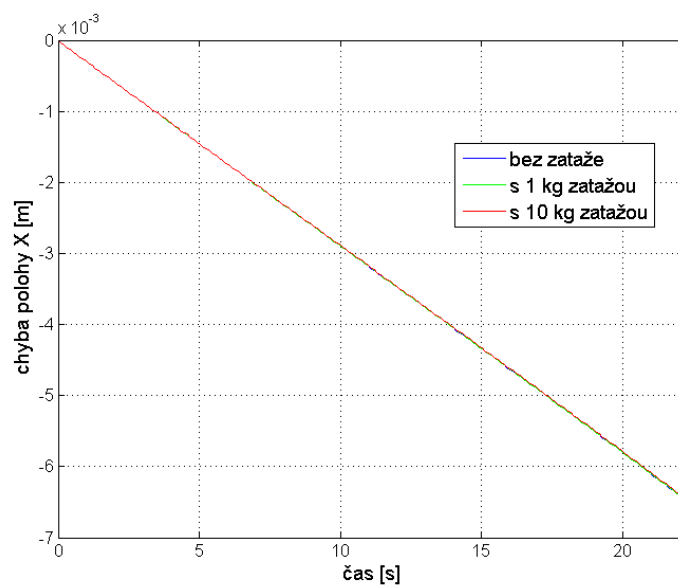
Na zakomponovanie pružných telies do virtuálneho prototypu v prostredí programu MSC.ADAMS je k dispozícii modul Adams/Flex. Pružné teleso v prostredí externého konečno-prvkového programu reprezentuje súbor MNF (Modal Neutral File), ktorý obsahuje všetky dôležité údaje o zotrvačných a pružných vlastnostiach pružného telesa ako aj informácie potrebné pri zakomponovaní pružného telesa do virtuálneho prototypu v prostredí programu MSC.ADAMS pomocou modulu A/Flex.

Nakoľko ramená, kĺby a pohyblivá platforma sú dostatočne tuhé, prevádzali sa vzpery na pružné prvky, pretože sú najviac zaťažované, kvôli svojej dĺžke a materiálu, z ktorého sú vyrobené. Dôvodom nepoužitia prevedenia všetkých častí modelu delty na pružné, je veľké zaťaženie na grafiku a simulácie by potom prebiehali príliš dlho, prípadne by nemuseli byť dokončené kvôli slabšiemu procesoru.

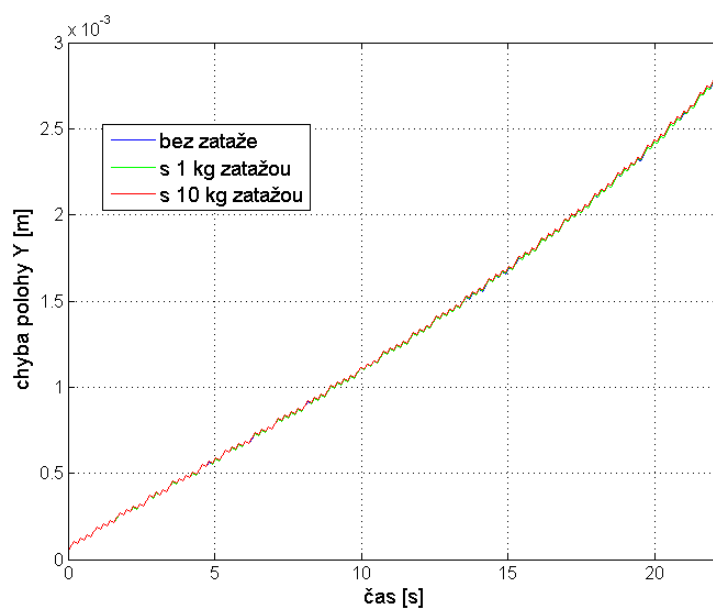
Prevod tuhých prvkov na pružné prebiehal tak, že z programu SolidWork, v ktorom sa vytváral model vzper, sa model previedol do formátu *parasolit* (.x\_t). Tento formát umožňuje načítať vzperu v programe ANSYS. Po načítaní telesa v programe ANSYS sa použil skript na vytvorenie modelu vo formáte *.mnf*. Tento skript je uvedený v prílohe A. Nakoniec tento vytvorený model vo formáte *mnf* sa importoval priamo do prostredia programe MSC Adams, kde sa pomocou väzieb zlúčil s ostatnými časťami modelu.

#### 5.4.3. Jednoduchá trajektória

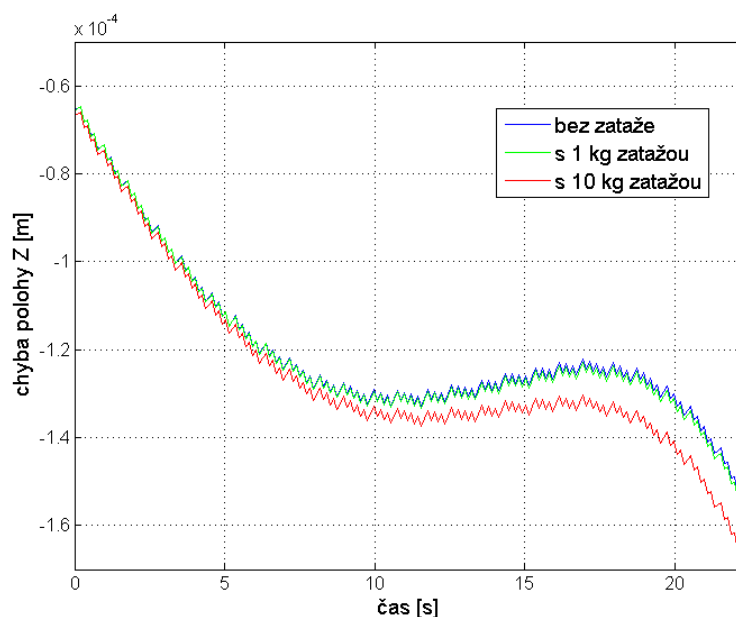
Simulácia modelu delty s pružnými prvkami prebieha pre pracovné podmienky tak ako pri testovaní modelu s tuhými prvkami, t.j. koncový efektor vykonáva priamočiary pohyb so zadanou počiatočnou a koncovou polohou pri konštantnej rýchlosti. Potom priebehy natočenia, rýchlostí a zrýchlenia jednotlivých ramien sú rovnaké ako v predchádzajúcej simulácii. V tejto podkapitole sa porovnávajú momentové charakteristiky pre jednotlivé zaťaženia pohyblivej platformy a odchýlka polohy efektora pri pohybe s modelom simulovanom ako tuhým telesom s modelom, v ktorom sú zakomponované pružné telesá.



Obr. 5. 15 Rozdiel polohy X s tuhými telesami vs. s pružnými telesami

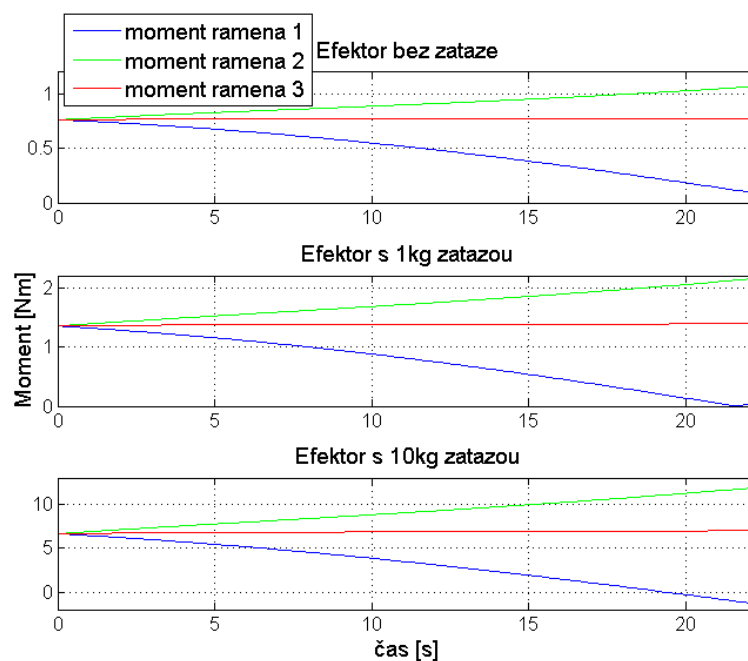


Obr. 5. 16 Rozdiel polohy Y s tuhými telesami vs. s pružnými telesami



Obr. 5. 17 Rozdiel polohy Z s tuhými telesami vs. s pružnými telesami

Z týchto grafov (5.15-.5.17) je vidieť, že manipulator s pružnými prvkami pri vykonávaní manipulácie, dosahuje približne rovnaké výsledky ako pri manipulácii bez použitia flexibilných telies. V tejto simulácii manipulator bez záťaže a s použitím 1 kg záťaže vykazuje najväčšiu odchýlku polohy efektrora v konečne zadanej polohe iba 0,03 % a s použitím 10 kg záťaže 0,037 % v zložkách v porovnaní s modelom s tuhými telesami. V zložke  $x$  sa v konečnej polohe líšia vzdialenosti približne o 5,6 % so zakomponovanými záťažami alebo bez záťaže a v  $y$  zložke je rozdiel 1,2 %.



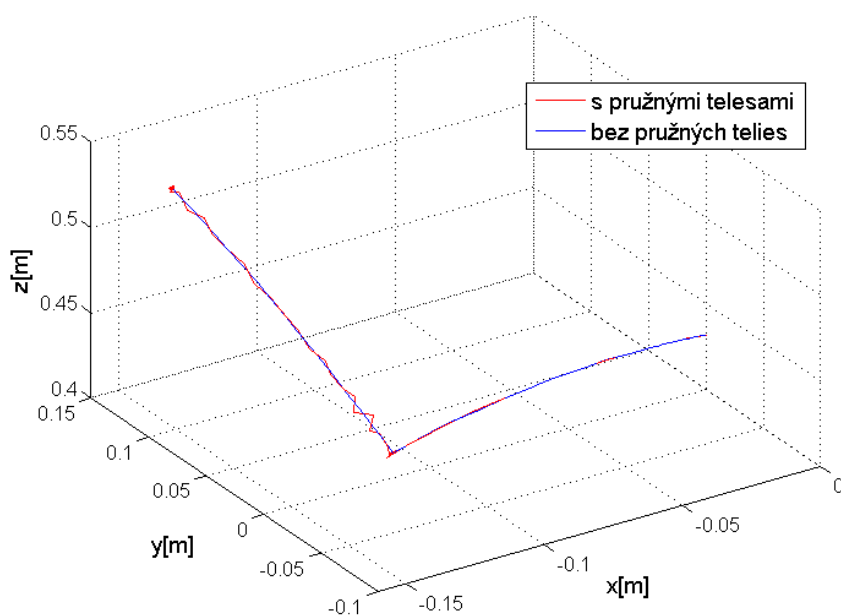
Obr. 5. 18 Priebeh momentov pre jednotlivé zaťaženia pri použití pružných telies

Na obrázku (5.18) sú znázornené priebehy momentov v čase, ktoré musia pôsobiť v pohonoch, aby koncový efektor vykonával priamočiary pohyb o konštantnej rýchlosti pri použití pružných telies v modeli. S porovnaním s charakteristikami v obrázku (5.13) vychádzajú priebehy momentov skoro rovnaké, rozdiel medzi nimi je približne 0,3 %.

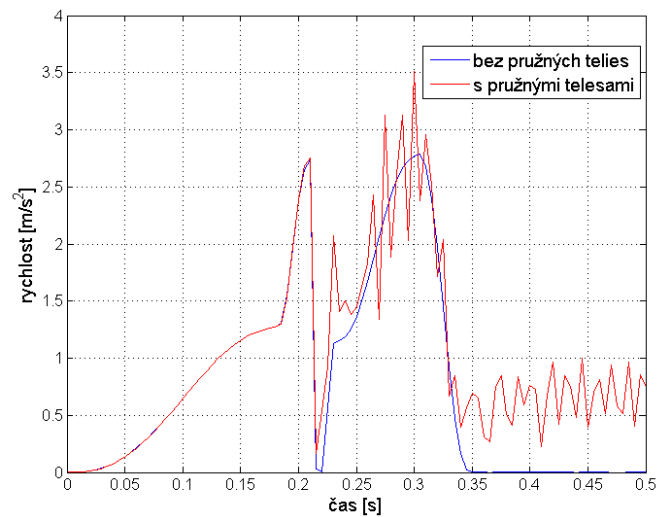
Odchýlky vypočítané z meraní polôh koncového efektora a z nameraných momentov získané z modelov so zakomponovanými pružnými prvkami a z modelov bez pružných prvkov sú zanedbateľné, i keď boli použité veľké záťaže, pretože efektor sa pohybuje stálou rýchlosťou, potom je zrýchlenie nulové, tým pádom sú nulové aj zotrvačné sily.

#### 5.4.4. Zložitejšia trajektória

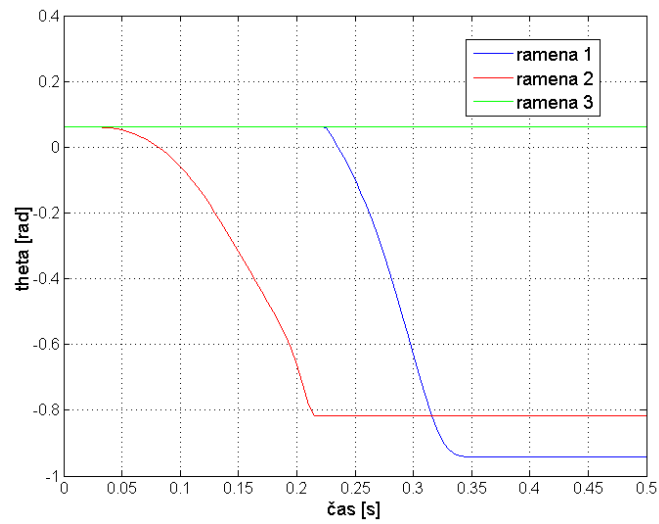
V tejto podkapitole prebieha simulácia modelu zaťažného 10 kg záťažou, v ktorom koncový bod efektora sa pohybuje po zložitejšej dráhe v porovnaní s predchádzajúcou simuláciou a je zobrazená na obrázku (5.19). Z tohto obrázku je zrejmé, že pri tejto trajektórii má koncový objekt modelu s pružnými prvkami veľké odchýlky dráhy v porovnaní s dráhou vykonávajúci objekt modelu s tuhým telesami. Efektor sa pohybuje vo vopred daných súradniciach, pričom rýchlosť pohybu efektora exponenciálne stúpa, prípadne klesá v danom čase (obr. 5.20). Na tomto obrázku je zakreslené porovnanie rýchlosti pohybu efektora modelu s pripojenými pružnými telesami a rýchlosti pohybu efektora manipulátora bez pripojených pružných telies. Manipulátor v čase 0,22 sekúnd sa zastavil približne na 0,02 sekúnd.



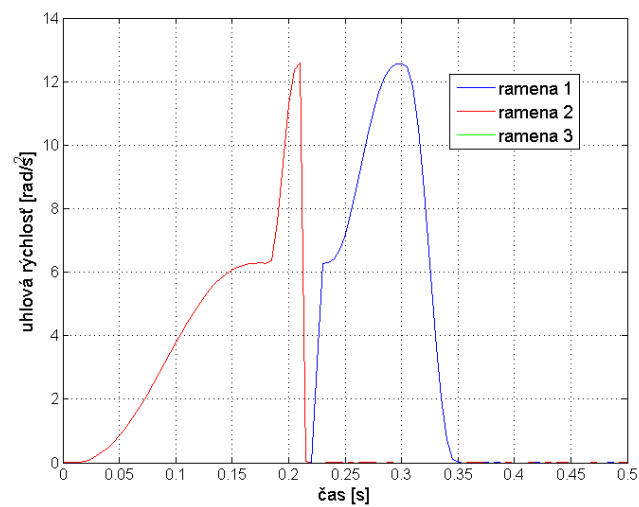
Obr. 5. 19 Porovnanie dráh efektora zobrazené v priestore



Obr. 5. 20 Pribeh rýchlosti pohybu efektora

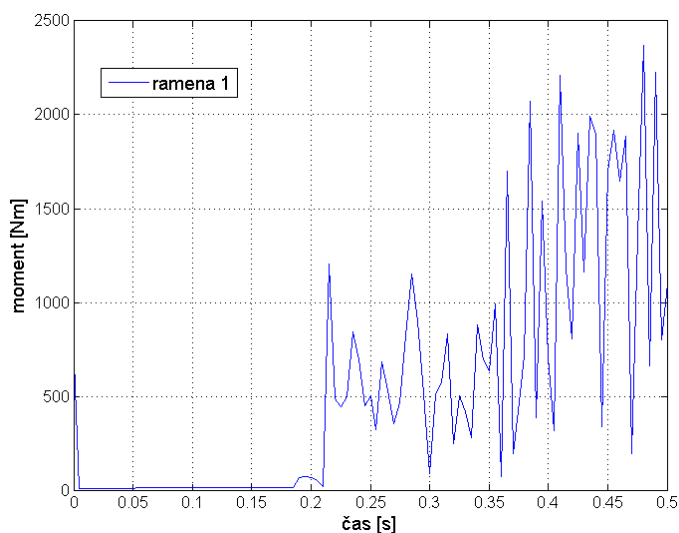


Obr. 5. 21 Pribeh natočenia ramien danej trajektórie s využitím pružných telies

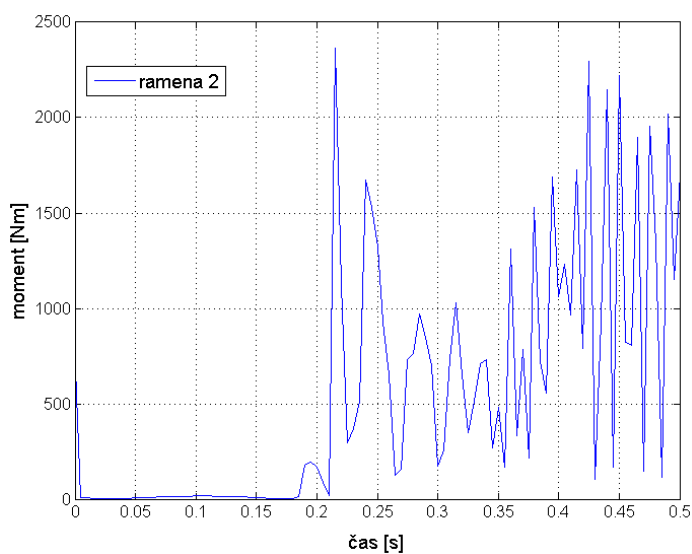


Obr. 5. 22 Pribeh rýchlosti natáčania ramien danej trajektórie s využitím pružných telies

V grafoch (5.21) a (5.22) sú zobrazené priebehy natáčania a rýchlostí natáčania ramien. Uhlová rýchlosti ramien 1 a 2 narastajú, prípadne klesajú exponenciálne, pričom rameno 3 má po celý čas nulovou rýchlosť, pretože od začiatku simulácia nevykonáva žiadny pohyb. Z týchto výsledkov je zrejmé, že manipulátor preruší pohyb v čase 0,22 sekúnd, t.j. zastaví sa približne na 0,02 sekundy.

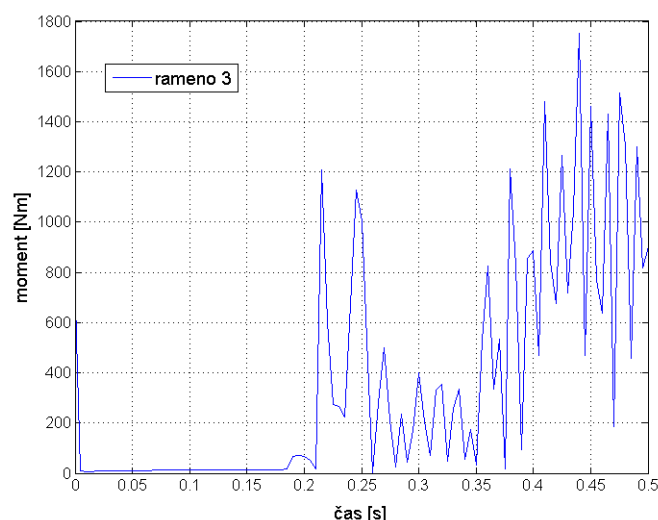


Obr. 5. 23 Priebeh momentu pôsobiaci na ramene 1 danej trajektórie pri použití pružných telies



Obr. 5. 24 Priebeh momentu pôsobiaci na ramene 2 danej trajektórie pri použití pružných telies





Obr. 5. 25 Priebeh momentu pôsobiaci na rameno 3 danej trajektórie pri použití pružných telies

Na obrázkoch (5.23) až (5.25) sú zobrazené momenty, ktoré pôsobia v pohonoch. Od času 0,22 sekúnd začínajú mať momenty špičkové priebehy, čo je spôsobené zastavením pohybu koncového efektora na 0,02 sekúnd. Toto pozastavenie manipulátora má za následok rozkmitanie sústavy prostredníctvom zotrvačných síl. Nakoľko sa efektor nepohybuje konštantnou rýchlosťou, respektíve zrýchlenie nie je nulové, pôsobia na efektor zotrvačné sily.

Touto simuláciou sa chcelo poukázať na závislosť dynamiky modelu s využitím pružných telies na veľkosti rýchlosti, respektíve zrýchlenia pohybu koncového bodu efektora. To znamená, že efektor, ktorý sa pohybuje s určitým zrýchlením, začnú naň pôsobiť zotrvačné sily, ktoré výrazne ovplyvňujú správanie pružných telies.

## 6. Záver

Cieľom diplomovej práce bola simulácia nami zvoleného paralelného mechanizmu. Na splnenie daného cieľa sa zvolili nasledovné parciálne ciele:

- analyzovať súčasné prístupy k simulačnému modelovaniu paralelných mechanizmov,
- zostaviť simulačný model zvoleného paralelného mechanizmu,
- analyzovať správanie modelu pre vybrané pracovné režimy.

Lepšiemu pochopeniu danej problematiky predchádzala rešeršná časť, ktorá sa venuje robotizácii. Rešeršná časť má za úlohu oboznámiť čitateľov a dať im stručnú predstavu o týchto mechanizmoch.

Vďaka výhodám paralelných mechanizmov zahŕňajúce napríklad lepšie dynamické vlastnosti a menšie namáhanie konštrukcií, sa dosahuje nižšia energetická náročnosť týchto strojov. Z historického skúmania plynie, že vytvorenie paralelných mechanizmov nebolo vždy spojené z jednoznačným cieľom. Od ich vzniku prešli dlhým vývojom. Z analýzy strojov s paralelnou kinematickou štruktúrou sa dospelo k záveru, že sa tieto začali uplatňovať čoraz viac v priemysle, a to nie len v oblasti manipulácie, ale i v oblasti výroby.

Po stručnej charakteristike mechanizmov v prvej kapitole nasleduje analýza prvého čiastkového cieľa záverečnej práce, ktorý predstavuje analýzu súčasných prístupov k simulačnému modelovaniu paralelných mechanizmov. V tejto časti sa popisuje spôsob výpočtu kinematickej a dynamickej analýzy. Najprv sa táto téma zaoberá kinematikou a dynamikou všeobecne pre každý manipulátor, neskôr sa oboznamuje s kinematickou analýzou delta robota skonštruovaného na Ústave výrobných strojov, systémov a robotiky Fakulty strojného inžinierstva VUT v Brne a dynamikou analýzou, ktorá je približne načrtnutá pomocou princípu virtuálnych prác. Kinematická analýza delta robota prezentovaná v tejto práci, je založená na analytickej geometrii. Riešenie priamej a nepriamej úlohy kinematiky sa overovalo pomocou 3D modelu, ktorý bol zostavený v programe SolidWorks a následne bol importovaný pomocou tohto programu do programu MSC Adams. Samotné porovnávanie kinematiky prebiehalo v programoch MSC Adams a Matlab, ktoré medzi sebou komunikovali cez určené vstupné a výstupné premenné. Ďalej pomocou programu MSC Adams sa robila dynamická analýza, ktorej výstupom boli priebehy momentov pôsobiace v pohonoch. Cieľom tejto dynamickej analýzy delta robota bolo získanie priebehov momentov, ktoré budú použité pri návrhu pohonov.

Ďalším cieľom práce je analýza správania modelu pre vybrané pracovné režimy. Simulácia prebiehala pomocou co-simulácie, respektíve komunikáciou MSC Adamsu s Matla-

bom. V programe Matlab prebiehal výpočet kinematiky, presnejšie inverznej kinematiky, ktorej výsledky boli posielané ako vstupné hodnoty do programu MSC Adams. Simulácia manipulátora prebiehala v rôznych pracovných režimov, ako napríklad pohyb robota bol vykonávaný bez použitého zaťaženia, prípadne s použitím záťaže. Najprv prebiehala statická analýza manipulátora, ktorá je potrebná na určenie vlastností delta robota, ktorý ostáva v základnej polohe. Následne sa skúmali vlastnosti manipulátora, ktorého efektor vykonával priamočiary pohyb.

Na záver prebiehala simulácia modelu pri tých istých pracovných režimov za použitia pružných telies, ktoré boli vytvorené v programe ANSYS. Cieľom tejto časti bolo zistenie správania sa modelu pri použití pružných telies, pričom sa vytvárali iba pružné vzpery z dôvodu ich citlivosti na dynamiku pohybu manipulátora. Výsledkom tohto pozorovania je, že pri priamočiarom pohybe efektora poloha koncového bodu sa odlišuje približne o 5 %, a to pri najväčšom použitom zaťažení. Malá odchýlka bola spôsobená skutočnosťou, že efektor sa pohybuje konštantnou rýchlosťou, a preto naň nepôsobia zotrvačné sily. V poslednej simulácii je znázornený pohyb efektora po zložitejšej trajektórii, kde už nemá konštantnú rýchlosť. Zo simulácie je vidieť začínajúce pôsobenie zotrvačných síl. Pre príčinu veľkých zrýchlení nastávajú veľké odchýlky dráhy s porovnaním s dráhou, ktorú vykonáva manipulátor bez zaskomponovaných pružných prvkov.

V tejto práci boli dosiahnuté všetky ciele a výsledky môžu byť použité pre ďalšie skúmanie prípadne využité na vyučovanie kinematiky a dynamiky.

## Literatúra

- [1] Skařupa J.: Průmyslové roboty a manipulátory. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2007, ISBN 978-80-248-1522-0
- [2] Mráz P.: Průmyslové roboty v praxi. Ústav výrobních strojů a mechanismů
- [3] Barborák O.: Základy robotizace – mechanické aspekty robotů a manipulátorů. Trenčianska univerzita A.Dubčeka v Trenčíne, 2009, ISBN 978-80-8075-377-1, EAN 978808075371
- [4] Božek P.: Špecializované robotické systémy. Trenčianska univerzita A.Dubčeka v Trenčíne, 2011, ISBN 978-80-904766-3-9
- [5] Gosselin, C.: Parallel computational algorithms for the kinematics and dynamics of planar and spatial parallel manipulators. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 118(1) (1996), p. 22-28
- [6] Merlet, J. P.: Parallel robots, 2nd Edition. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2005
- [7] KNOFLÍČEK, Radek, PLŠEK, Ladislav. Paralelní kinematické struktury výrobních strojů a průmyslových robotů. [s.l.] : [s.n.], 2006. 43 s.
- [8] Dasgupta, B., Choudhury, P.: A general strategy based on the Newton-Euler approach for the dynamic formulation of parallel manipulators. Mechanism and Machine Theory, Vol. 34(6) (1999), p. 801 - 824
- [9] Miller, K.: Dynamics of the New UWA Robot. Proceedings of Australian Conference on Robotics and Automation, Sydney, 2001
- [10] Cheng, H., Yiu, Y., Li, Z.: Dynamics and Control of Redundantly Actuated Parallel Manipulators. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 8(4) (2003), p. 483 – 491
- [11] Liu, M., Li, C., Li, Ch.: Dynamics Analysis of the Gough–Stewart Platform Manipulator. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 16(1) (2000), p. 94 – 98
- [12] Codourey, A., Burdet, E.: A Body-oriented Method for Finding a Linear Form of the Dynamic Equation of Fully Parallel Robots. Robotics and Automation, Vol. 2 (1997), p. 1612 – 1618
- [13] BRADÁČ, František. Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky [online]. 2011 [cit. 2011-05-13]. Manipulátor na bázi paralelní kinematiky – delta robot s třemi osami. Dostupné z WWW: <[http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page\\_id=991](http://www.uvssr.fme.vutbr.cz/?page_id=991)>.

- [14] Ecorchard, G. and Maurine, P. Self-Calibration of Delta Parallel Robots with Elastic Deformation Compensation. Intelligent Robots and Systems. 2005, pp. 462-467.
- [15] Codourey, Alain. Dynamic Modeling of Parallel Robots for Computed-Torque Control Implementation. The International Journal of Robotics Research. 1998, Vol. 17, 12, pp. 1325-1336.
- [16] Gross, Hauger, Schröder, Wall. Technische Mechanik 3. Berlin : Springer-Verlag, 2008. ISBN:978-3-540-68422-0.
- [17] Grepl R.: Kinematika a dynamika mechatronických systémů. 2007, Vysoké učení technické v Brně, ISBN 978-80-214-3530-8
- [18] Spong, Mark W. and Vidyasagar, M. Robot Dynamics and Control. : John Wiley & Sons Inc, 1989
- [19] Palčák F.: Mechanika viazaných mechanických systémov. STU Bratislava, 2010
- [20] MSC Adams help. Dostupný z WWW: <[http://www. http://www.mscsoftware.com/](http://www.mscsoftware.com/)>

## Zoznam skratiek

DOF- počet stupňov voľnosti

R- rotačná väzba

S- sférická väzba

## Zoznam značiek

A- matica zotrvačnosti

$A_i$  - tri body, ktoré sa nachádzajú v strede troch strán báze

$B_i$ - pozícia pasívnych sférických kĺbov (medzi ramenom a vzperou)

C- matica, ktorá popisuje výpočet odstredivej a Coriolisovej sily

$C_i$ - pozícia sférických kĺbov (medzi vzperou a pohyblivou platformou)

E- poloha koncového bodu efektora v karteziánskych súradniciach

F – počet DOF

$F_n$ - zotrvačná sila

G- matica, ktorá obsahuje gravitačné sily pôsobiace na manipulátor

$G_n$ - gravitačná sila

$G_r$ - gravitačná sila pôsobiaca na ťažisko každého horného ramena

$I_r$ - matica zotrvačnosti ramien v kĺbovom systéme

J- Jakobiho matica

$\hat{K}$ - zovšeobecnená matica tuhosti.

$\hat{M}$ - zovšeobecnená matica hmotnosti

$I, 0$  – jednotková a nulová matica

P- bod stredu základne

$R_{zi}$ - rotačná matica

X- pozícia koncového efektora v ose x

Y- pozícia koncového efektora v ose y

Z- pozícia koncového efektora v ose z

$X_0$ - vektor, ktorý popisuje súradnice (x, y, z) pozície pre koncový efektor v počiatočnom čase  $t_0$

$X_f$ - vektor, ktorý popisuje súradnice (x, y, z) pozície pre koncový efektor v konečnom čase  $t_f$

$\dot{X}_0$ - prvá derivácia vektoru  $X_0$  podľa času

$\dot{X}_f$ - prvá derivácia vektoru  $X_f$  podľa času

$X_p$ - požadovaná (x, y, z) pozícia v čase t

$\dot{X}_p$ - prvá derivácia  $X_p$  v čase t

$\ddot{X}_p$ - druhá derivácia  $X_p$  v čase t

e - dĺžka strany pohyblivej platformy

g- gravitačné zrýchlenie

j – počet kinematických dvojíc

n – počet všetkých členov mechanizmu

$l_r$  – dĺžka ramena,

$l_v$  – dĺžka vzpery.  
 $m_k$  - hmotnosť kĺbu  
 $m_p$  - hmotnosť pohyblivej platformy  
 $m_{pcel}$  - celková hmotnosť delta robota  
 $m_r$  - hmotnosť ramena  
 $m_{vz}$  - hmotnosť vzpery  
 $m_{zat}$  - hmotnosť záťaže  
 $p$  - dĺžka strany základne  
 $q_i$  - modálne súradnice  
 $q_C$  – modálne súradnice väzbových modálnych tvarov s jednotkovým posunutím  
 $q_N$  – modálne súradnice väzbových modálnych vlastných tvarov s ukotvením telesa vo väzbách  
 $r$  - pomer hmotností vzpier  
 $r_{Gr}$  - poloha ťažiska pre každé rameno  
 $s$  – počet pasívnych väzieb tzv. geometrické predpoklady  
 $u_B$  – väzobné premiestnenia (DOF)  
 $u_I$  – vnútorné premiestnenia (DOF)  
 $\bar{u}$  - vektor, ktorý reprezentuje malé lineárne deformácie konečno-prvkového telesa  
 $\lambda$  – konštanta potrebná na určenie mobility  
 $\xi_i$  – počet DOF od jednotlivých kinematických dvojíc  
 $\xi_{id}$  – DOF členov, ktorí nemajú vplyv na polohu efektora  
 $\theta_i$  - uhlo pre natočenie ramien  
 $\tau$  - vektor sily/momentu zodpovedajúci virtuálnemu posuvu/natočeniu  $\delta\theta$  väzby  
 $\tau_n$  - je sila/moment pôsobiaca na pohyblivú platformu a zodpovedajúca virtuálnemu posunutiu  $\delta X_n$  v karteziánskom systéme  
 $\delta X_n$  - virtuálne posunutie v karteziánskom systéme  
 $\dot{\theta}$  - väzbová rýchlosť  
 $\tau_{Gr}$  - moment pôsobiaci na kĺb vytváraný gravitačnou silou každého ramena  
 $\tau_r$  - moment tvorený silou zotrvačnosti pôsobiaceou na každé rameno  
 $\tau$  je vektor momentov, ktoré majú byť použité na troch riadiacich väzbách  
 $\phi_i$  - vlastné vektory (modálnych tvarov)  
 $\Phi_{IC}$  - fyzikálne premiestnenia telesa v miestach vnútorných uzlov pri väzobných modálnych tvaroch s jednotkovým posunutím  
 $\Phi_{IN}$  - fyzikálne premiestnenia telesa v miestach vnútorných uzlov pri väzobných modálnych tvaroch s ukotvením telesa vo väzbách

## Zoznam príloh

### Obsah CD

- diplomová práca
- m-file počítajúce kinematiku Delta manipulátora
- m-file spustiaci simuláciu
- vzpery vo formáte .mnf
- súbor MSC Adams, ktorý obsahuje model bez použitia pružných prvkov
- súbor MSC Adams, ktorý obsahuje model s použitím pružných prvkov

### Príloha A

Príloha obsahuje skript na vytvorenie mnf súboru.

/TITLE, tahlo

/FILENAME,tahlo,0

/TITLE, tahlo

/FILENAME,tahlo,0

/CWD,'D:\tahlo\'

/UNITS, SI ! MPA system (m, kg, s, °C).

!nacitanie noza

!

ET,1,SOLID186 ! Define SOLID185 as element type 1

ET,2,MPC184 ! Define BEAM188 as element type 2

KEYOPT,2,1,1

KEYOPT,2,2,0

!

MP,EX,1,1.4e11 ! Material of the

MP,PRXY,1,0.345

MP,DENS,1,1650

!MESH

FLST,2,5,5,ORDE,2

FITEM,2,2

FITEM,2,-6

AESIZE,P51X,0.001,

ESIZE,0.01,0, ! velikost

MSHAPE,1,3D

MSHKEY,0



```

!*
VSEL,S,,,1
!*
VMESH,ALL
!*
VSEL,ALL
!*
!NODY
! Define interface points: numbers must be higher than highest
! node number already defined
N,1000000,0,0,0      ! Define interface point 1
ASEL,S,,,4 ! vyber plochy
NSLA,R,1
NSEL,A,,,1000000    ! Also select interface node
!
! Generate spider web of beams
*GET,nmin,node,,num,min
*GET,nnum,node,,count
*SET,jj,0
TYPE,2
MAT,2
REAL,1
*DO,jj,1,nnum-1
    E,1000000,nmin
    NSEL,u,,,nmin
    *GET,nmin,node,,num,min
*ENDDO
!
ALLS
N,1000001,0.5,0,0    ! Define interface point 1
ASEL,S,,,3 ! vyber plochy
NSLA,R,1
NSEL,A,,,1000001    ! Also select interface node
TYPE,2
MAT,2
REAL,1
!
! Generate spider web of beams
*GET,nmin,node,,num,min

```

```
*GET,nnum,node,,count
*SET,jj,0
*DO,jj,1,nnum-1
    E,1000001,nmin
    NSEL,u,,,nmin
    *GET,nmin,node,,num,min
*ENDDO
!
ALLS
!/eof
```

```
!/UNITS,MKS          ! Define units used: millimeter, megagram, second, newton
!SAVE                ! Save database
NSEL,S,,,1000000,1000001    ! Select interface points
ADAMS,1,1            ! Start ADAMS macro,
! adamsout.mnf is written
FINISH
```